

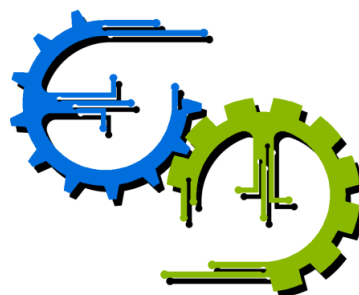
Trabalho de Graduação

Automatização de troca de marcha para carro de Fórmula SAE

Por,

Vitor Hugo Américo Rezende 10/0127134

Brasília, dezembro 2017



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Mecanismo para automatização de troca de marcha para carro de Fórmula SAE

POR,

Vítor Hugo Américo Rezende

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de
Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Aida A. Fadel, UnB/ENM (Orientadora)

Prof. Alberto Carlos G. C. Diniz, UnB/ENM

Prof. Lélío Ribeiro S. Júnior, UnB/ ENE

Brasília, dezembro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

REZENDE, VÍTOR HUGO AMÉRICO

Automatização para troca de marcha de carro de Fórmula SAE,

[Distrito Federal] 2017.

xvii, 62p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2017). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília.Faculdade de Tecnologia.

1. Automatização

2. Fórmula SAE

3. Marcha

4. Pneumático

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

REZENDE, VITOR H. A. (2017). Automatização para troca de marcha de carro de Fórmula SAE. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 002 , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 63p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Vítor Hugo Américo Rezende.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Automatização para troca de marcha de carro de Fórmula SAE.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Vítor Hugo Américo Rezende

Campus Darcy Ribeiro, Bloco G, Universidade de Brasília
Brasília – DF – Brasil.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, causa primaria de todas as coisas. Aos meus pais Edson e Salete que sempre me ofereceram o melhor ensino e educação, além de sempre apoiarem minhas escolhas e decisões. Me ensinaram a sonhar sempre grande e incentivaram a estudar em uma universidade reconhecida nacionalmente. Agradeço em especial a minha namorada Carolina Braga por me ajudar tanto no meio acadêmico quanto no pessoal e espiritual.

Agradeço ainda a todos meus companheiros de equipe da Apuama Racing que foram essenciais para troca de experiências e criação de um ambiente divertido de trabalho, projetando e construindo o carro de competição para Fórmula SAE. Essa experiência adquirida em trabalho em grupo foi desenvolvida na maior parte dentro dessa equipe.

Durante a minha vida acadêmica tive o prazer de conhecer alguns professores que me inspiraram e que eu sempre lembrarei deles. Em especial aos professores do ensino médio prof. Antônio Luciano, prof. Roque e prof. André Fratteezi, professores que me passaram muito mais do que matérias que lecionavam e aos professores da Universidade de Brasília (UnB) como prof. Marcela R. Machado e prof. Aida A. Fadel que me ajudaram no desenvolvimento desse trabalho. Agradeço também aos meus amigos de turma que trilharam essa jornada comigo durante a graduação.

Vítor Hugo Américo Rezende

RESUMO

O presente trabalho apresenta o estudo, concepção e validação dos sistemas elétrico e pneumático para troca de marcha de um carro de Fórmula SAE. O principal objetivo é melhorar a performance do carro durante as competições, auxiliando o piloto durante as trocas de marcha e diminuindo o tempo de troca e uso da embreagem. Além de aplicar os conhecimentos adquiridos no curso e experiências trocadas durante os projetos desenvolvidos na Universidade de Brasília (UnB). A concepção do projeto está detalhada nesse trabalho, bem como alguns resultados obtidos, que se mostrou viável para aplicação como solução para as demoras de troca das marchas.

ABSTRACT

The present work presents the study, design and validation of electric and pneumatic systems for the gear change of a Formula SAE car. The main objective is to improve the performance of the car during competitions, assisting the rider during how to change gears and reducing the time of change and use of the clutch. In addition to applying the knowledge acquired in the course and experiences exchanged during the projects developed at the University of Brasília (UnB). A project design is detailed in the work, as well as some results obtained, which are shown for application as a solution to the gearshift delays.

Sumário

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	3
1.1. MOTIVAÇÃO	3
1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	4
1.3. OBJETIVO DO PROJETO	5
1.3.1. Objetivos gerais.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO MANUSCRITO	5
Capítulo 2 – FUNDAMENTOS E ESTADO DA ARTE	6
2.1. TÉCNICA “QUICK SHIFTER” PARA TROCA DE MARCHAS	6
2.2. ESTADO DA ARTE	7
2.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS APLICADOS.....	8
2.3.1. TORQUE.....	8
2.3.2. SENSORES.....	9
Sensor indutivo	9
Sensor de contato	10
Sensor hall.....	11
2.4. SISTEMA PNEUMÁTICO.....	11
2.4.1. Válvulas pneumáticas	11
2.4.2. Atuador pneumático	11
2.4.3. Reservatório de ar.....	12
Capítulo 3 – CONCEPÇÃO, MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1. CONCEPÇÃO DO PROJETO	13
3.2. MATERIAIS.....	15
3.2.1. Pistão pneumático	15
3.2.2. Sistema de controle e sensoriamento	21
3.2.3. Sistema de potência.....	22
3.2.4. Reservatório de ar comprimido	24
3.2.5. Válvula pneumática.....	26
Capítulo 4 - PROJETO E RESULTADOS	28
4.1. SISTEMA PNEUMÁTICO.....	28
4.1.1. Análise Cinemática	28
4.1.2. Análise de força e momento	32
4.1.3. Circuito pneumático.....	34
4.2 – SISTEMA DE POTÊNCIA.....	36
Capítulo 5 – MONTAGEM E VERIFICAÇÃO	40

5.1. Sistema Pneumático	40
A montagem dos componentes foi dividida em 3 etapas:	40
5.2. Sistema Elétrico.....	42
Capítulo 6 – CONCLUSÃO	43
Capítulo 7 – PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	44
7.1. Sincronização dos sistemas.....	44
7.2. Implementação dos componentes dimensionados.....	44

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Foto da competição Fórmula Society of Automotive Engineers (FSAE).	4
Figura 1.2 – Sistema manual de troca de marcha.	5
Figura 2.1 – Gráfico de rotação do motor vs velocidade	6
Figura 2.2 – Sistema de sensor desenvolvido pela Dynojet	7
Figura 2.3 – Sistema pneumático da Holinger para acionamento de embreagem	8
Figura 2.4 – Sistema pneumático da Geartronics.	8
Figura 2.5 – Força F sendo aplicada em uma alavanca de comprimento d .	9
Figura 2.6 – Representação gráfica da saída do sensor indutivo	9
Figura 2.7 – Movimentação do alvo em relação ao sensor	10
Figura 2.8 – Representação do sensor de contato	10
Figura 2.9 – Pistão de dupla ação	12
Figura 3.1 – Diagrama de interação entre os sistemas.	13
Figura 3.2 – Alavanca de câmbio para realizar trocas manuais.	14
Figura 3.3 – Circuito pneumático sem o <i>backup</i> manual.	15
Figura 3.4 – Gráfico de flambagem da haste, diâmetro da haste = f (curso x força).	16
Figura 3.5 – Casos de fixação do atuador e da carga para determinar λ	18
Figura 3.6 – Cota do pistão estendido, com braço de alavanca de 41 mm	19
Figura 3.7 – Arduino Uno.	21
Figura 3.8 – Sensor magnético para pistão com êmbolo magnético.	22
Figura 3.9 – MOSFET IRF 540	22
Figura 3.10 – Módulo de relés.	23
Figura 3.11 – Esquemático para acionamento de relé, a partir do Arduino.	23
Figura 3.12 – Reservatório de ar comprimido com manômetro e válvula de segurança.	24
Figura 3.13 – Esquemático da válvula.	26
Figura 3.14 – Válvula modelo VUVS-L25-P53C-MZD-G14-F8.	26
Figura 4.1 – Exemplo do mecanismo biela-manivela.	28
Figura 4.2 – Modelo 3D dos componentes para o estudo cinemático.	28
Figura 4.3 – Relação entre deslocamento linear do atuador com o deslocamento angular da alavanca no caso 1, em que a montagem é semelhante à mostrada na Figura 4.4.	29
Figura 4.4 – Tipo de montagem para o caso 1.	29
Figura 4.5 – Relação entre deslocamento linear do atuador com o deslocamento angular da alavanca no caso 2, em que a montagem é semelhante à mostrada na Figura 4.6.	30
Figura 4.6 – Tipo de montagem para o caso 2.	30
Figura 4.7 – Relação entre deslocamento linear do atuador com o deslocamento angular da alavanca no caso 3, em que a montagem é semelhante à mostrada na Figura 4.8.	31
Figura 4.8 – Tipo de montagem para o caso 3.	31
Figura 4.9 – Simulação de esforço da alavanca com 700 N.	32
Figura 4.10 – Simulação de esforço da alavanca com 700 N.	33
Figura 4.11 – Simulação de esforço da alavanca com 700 N.	33
Figura 4.12 – Circuito pneumático utilizando uma válvula 5/3.	34
Figura 4.13 – Atual sistema pneumático.	35
Figura 4.14 – Posição e velocidade em relação ao tempo. Pressão de trabalho de 4 bar.	35
Figura 4.15 – Pressão em relação ao tempo. Pressão de trabalho de 4 bar.	36
Figura 4.16 – Esquemático do circuito de chaveamento para cargas.	37
Figura 4.17 – Tensão nas portas Gate e Drain do MOSFET	37

Figura 4.18 – Circuito de potência para acionamento de carga.....	38
Figura 4.19 – Placa de potência com os 7 canais de MOSFETs.....	39
Figura 5.1 – Atuador pneumático instalado no carro.	41
Figura 5.2 – Teste do sistema elétrico no acionamento da bomba de combustível.	42
Figura 7.1 – Critério de Euler para dimensionamento do diâmetro da haste para o caso 1 (Figura 3.5)	50
Figura 7.2 – Critério de Euler para dimensionamento do diâmetro da haste para o caso 2 (Figura 3.5)	51
Figura 7.3 – Parte traseira do carro. Fixação do reservatório de ar comprimido.....	52
Figura 7.4 – Parte traseira do carro. Posicionamento do reservatório de ar comprimido.....	52
Figura 7.5 – Display indicador de marcha acoplado no volante.....	53
Figura 7.6 – Display indicador de marcha projetado.....	53
Figura 7.7 – Etapa de fabricação da aletas de troca de marcha.....	54
Figura 7.8 – Projeto do circuito de potência.	54
Figura 7.9 – Circuito de potência instalado.	55

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Variáveis, valores e unidades, para realizado o dimensionamento do diâmetro mínimo da haste.	19
Tabela 3.2 – Diâmetro mínimo da haste para os casos especificados na Figura 3.5.	20
Tabela 3.3 – Características dos pistões.....	20
Tabela 3.4 – Informações dos atuadores CWMI – Werk-Schott. Destacado em vermelho o atuador escolhido para o projeto.	21
Tabela 3.5 – Comparação entre relé e MOSFET.	23
Tabela 3.6 – Características do reservatório.....	24
Tabela 3.7 – Características da válvula VUVS-L25-P53C-MZD-G14-F8.....	26
Tabela 5.1 – Lista de componentes usados na montagem do sistema pneumático	40
Tabela 5.2 – Medição do deslocamento angular do eixo do câmbio.	41

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O homem sempre teve um viés competitivo desde a antiguidade, quando realizavam competição de corrida a cavalo. Em 1894 foi criada uma nova categoria de corrida, com a chegada dos carros movidos à gasolina, as corridas automobilísticas. Nelas eram colocadas à prova todas as habilidades dos pilotos, além da mecânica do carro, para obter bons resultados nas competições.

Com o avanço dos métodos de fabricação e da engenharia, os carros de competição ficaram cada vez mais rápidos e mais sofisticados. Hoje a Fórmula 1 é a competição em que se pode encontrar o último nível de tecnologias aplicadas em carros. Para exemplificar, o projeto e processo de fabricação desses carros se assemelham mais aos de caças de guerra do que dos carros, propriamente dito.

Não é uma tarefa fácil manter uma equipe em primeiro lugar, necessita de muito investimento. Na Fórmula 1, por exemplo, a diferença do primeiro lugar para o segundo é na casa de milissegundos por volta. Esse apoio financeiro em tecnologia e soluções para manter o carro nas primeiras colocações se dá graças ao altíssimo valor investido nas equipes pelos patrocinadores.

Dentre as opções de projetos que podem ser otimizadas para obter melhor desempenho do carro, encontra-se o sistema de transmissão. Ao realizar a troca de marcha, o motor deixa de enviar potência para a transmissão, consequentemente para as rodas. Isso causa desaceleração do carro durante o período de tempo em que esse processo ocorre. Na Fórmula 1, os carros fazem essa troca em questão de milissegundos, como é relatado na própria descrição de transmissão dos carros dessa categoria (Fórmula 1, 2017).

Com o sistema automatizado de troca de marcha, além do processo ser mais rápido, não necessita de muitos movimentos do piloto, isso significa que ele estará mais atento na pilotagem. Além disso, o número de marchas pode ser maior, pois a perda de inércia devido a troca será minimizada.

1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Com a busca das equipes de competição automobilísticas por melhor performance, faz-se necessária a otimização de componentes e sistemas. A troca de marcha manual é mais lenta do que nos modelos de câmbio automático. Além disso, o piloto deve tirar a mão do volante para realizar a troca manual. O sistema automatizado proporciona maior velocidade de trocas e também facilita a operação, do ponto de vista do piloto, trazendo grandes vantagens. A Figura 1.1 mostra uma das competições de Fórmula SAE nos Estados Unidos.



Figura 1.1 – Foto da competição Fórmula Society of Automotive Engineers (FSAE).

A equipe Apuama UnB/FSAE atualmente conta apenas com o sistema manual de troca de marcha. O piloto tem acesso à uma alavanca, posicionado no *cockpit*, em que é ligado, por meio de cabo, à alavanca do câmbio. A Figura 1.2 mostra o sistema responsável pela troca de marcha no veículo atual.



Figura 1.2 – Sistema manual de troca de marcha.

1.3. OBJETIVO DO PROJETO

1.3.1. Objetivos gerais

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema eletropneumático, confiável, e de fácil manutenção, capaz de trocar as marchas do carro FSAE, tanto progressivamente quanto na redução.

1.3.2. Objetivos específicos

- Levantamento das condições de contorno do projeto (forças, velocidades, deslocamentos, formas de fixação do atuador, consumo de ar e autonomia de trocas);
- Projetar e simular o mecanismo, incluindo componentes, como o atuador pneumático, as válvulas, a fonte de ar comprimido e tubulações além do sistema elétrico para acionamento;
- Comissionar o sistema (construir, testar, realizar ajustes necessários e avaliar possíveis melhorias a serem implementadas);

1.4. APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO MANUSCRITO

Este trabalho está organizado em 7 capítulos. O capítulo 1 apresenta o problema, a motivação e objetivos do trabalho. O capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos necessários para a compreensão dos assuntos tratados ao longo deste trabalho e o estado da arte. Em seguida, no capítulo 3 estão descritos a concepção do projeto, os materiais e métodos utilizados, bem como a integração de todos os componentes. O capítulo 4 apresenta a simulação do mecanismo e do atuador. No capítulo 5 os resultados dos testes são discutidos e a montagem do projeto no carro é detalhada. O capítulo 6 expõe as conclusões do presente trabalho e por último, o capítulo 7 refere-se às propostas para trabalhos futuros nessa área, com foco na melhoria do sistema.

Capítulo 2 – FUNDAMENTOS E ESTADO DA ARTE

2.1. TÉCNICA “QUICK SHIFTER” PARA TROCA DE MARCHAS

Os motores utilizados em carros de corrida da categoria de combustão da Fórmula SAE são de motos. O sistema de troca de marcha em motos é distinto das utilizadas na maioria dos carros, pois possuem uma alavanca com apenas um grau de liberdade que realiza a troca. Essa alavanca pode ser empurrada para baixo ou para cima, o que causa a mudança das relações na transmissão.

Usualmente é utilizada a embreagem para preservar as peças do câmbio e evitar os solavancos que ocorrem durante a troca, porém existe um método chamado de *Quick Shifter*, que possibilita essa troca sem o auxílio da embreagem para câmbio de moto. A Figura 2.1 apresenta o gráfico da rotação do motor em referência à velocidade de um automóvel, para diferentes marchas.

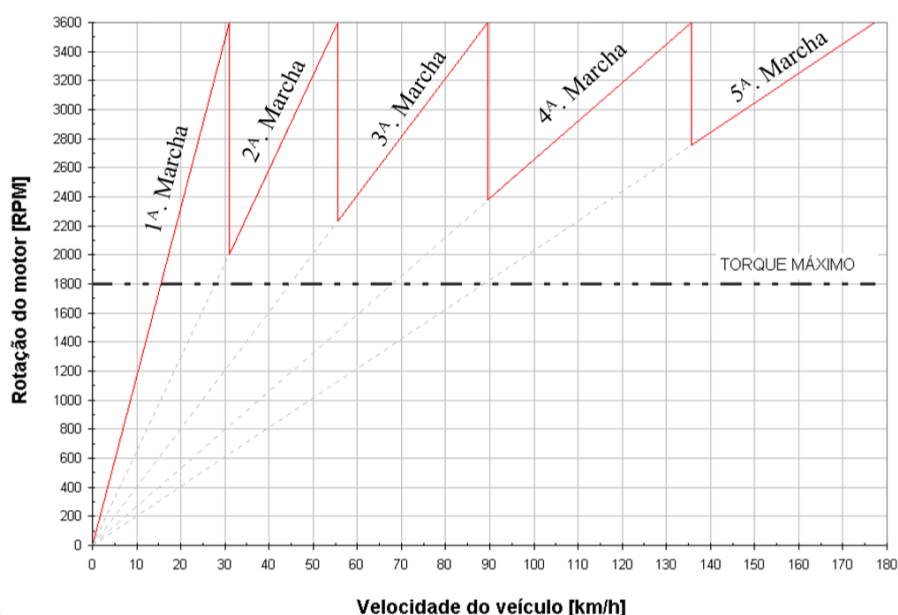


Figura 2.1 – Gráfico de rotação do motor vs velocidade (Fonte: [2])

O *Quick Shifter* é um sistema elétrico que funciona durante as trocas progressivas, ou seja, das menores marchas para as maiores. Ao reconhecer, por meio de sensores, que a marcha será trocada, o sistema “corta” o motor, em outras palavras, desliga o motor para que a troca seja realizada de modo mais suave e rápida, religando em seguida. Esse processo de desligar e ligar o motor dura em torno de 80 milissegundos, podendo variar de marcha para marcha.

Para exemplificar, é possível verificar no gráfico anterior que para a primeira marcha, em 3600 rmp ocorre a troca para a marcha seguinte, que está à 2000 rpm. Essa diferença de 1600 rmp é muito se comparamos com a quarta marcha para a quinta, em que a diferença é de, aproximadamente 800 rmp. Concluindo que o período em que o motor estará desligado é maior no primeiro caso do que no segundo.

Porém apenas com o sistema descrito anteriormente, não é possível realizar as trocas de marcha regressivas, ou seja, reduzir as marchas. Além disso cabe ao piloto realizar as trocas. O sistema é puramente passivo, apenas auxilia a troca.

Para suprir essa demanda, foi acrescentado ao conjunto os sistemas elétrico e pneumático, que serão detalhados nos próximos capítulos.

2.2. ESTADO DA ARTE

Com a busca de melhorar a performance de motos e carros, algumas empresas especializadas na área desenvolveram produtos para adaptar em veículos, um exemplo desse sistema é o *Dynojet Stand Alone Quick Shifter*, mostrado na Figura 2.2 a seguir:



Figura 2.2 – Sistema de sensor desenvolvido pela Dynojet. (Fonte: [3])

Além de diferentes modelos que podem ser encontrados no mercado, é possível também verificar que o método de acionamento do sistema é diferente, por exemplo, de algumas marcas que utilizam acelerômetro para identificar a troca de marcha, já outros usam sensores de deslocamento.

Já o sistema pneumático, por ser mais complexo e haver certa dificuldade em adaptações, as opções são mais limitadas, mas ainda existem. Um exemplo é a *Holinger*, que possui uma opção de sistema pneumático para acionamento da embreagem e um

sistema elétrico para realizar as trocas de marchas. A Figura 2.3 mostra o sistema pneumático da Holinger:



Figura 2.3 – Sistema pneumático da Holinger para acionamento de embreagem. (Fonte: [4])

Outra opção é a Geartronics, empresa especializada na parte de automação de marchas, possui um sistema completo para acionamento da embreagem e troca de marcha para motos. A Figura 2.4 mostra os componentes deste sistema:



Figura 2.4 – Sistema pneumático da Geartronics. (Fonte: [5])

2.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS APLICADOS

2.3.1. TORQUE

A relação entre força e torque será amplamente utilizada nesse trabalho uma vez que existe a necessidade de aplicar um torque para rotacionar o eixo, seja da embreagem ou do passador de marcha.

Se uma força F é aplicada à um braço de alavanca com comprimento d pivotado em um ponto P e essa força é aplicada de modo que faça um ângulo α em relação a alavanca, então podemos obter o torque dessa força de acordo com a Equação 2.1 seguinte:

$$T = d * F * \text{sen}(\alpha) \quad (2.1)$$

Em que T é o torque, d é o comprimento da alavanca; F é a força aplicada e α é o ângulo. A Figura 2.5 – Força F sendo aplicada em uma alavanca de comprimento d . representa a situação descrita acima, juntamente com a decomposição das forças.

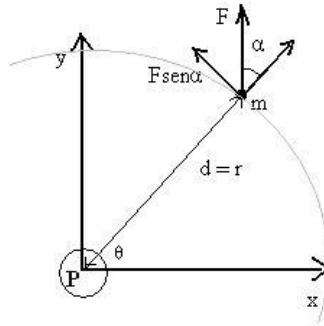


Figura 2.5 – Força F sendo aplicada em uma alavanca de comprimento d .

2.3.2. SENSORES

Sensor indutivo

Os sensores indutivos são classificados como sensores de não-contato, pois não necessitam ter o contato físico para detecção de objetos. Eles usam correntes induzidas por campos magnéticos e por isso possuem bobinas (indutância) que geram esse campo. Podem detectar vários tipos de metais. Esse tipo de sensor consiste em quatro elementos principais:

- Bobina;
- Oscilador
- Circuito de disparo
- Circuito de saída

A saída do sinal deste tipo de sensor oscila quando o alvo está ausente e se estabiliza ao identificar o alvo. A Figura 2.6 mostra a saída do sensor.

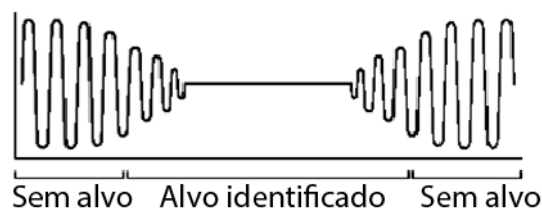


Figura 2.6 – Representação gráfica da saída do sensor indutivo. (Fonte: [6])

Para melhor precisão e funcionamento do sensor, deve-se respeitar o tempo de operação. Após ligar o sensor é necessário esperar 100 milissegundos, esse período é chamado de tempo de reset de potência. É importante salientar que ao desligar o sensor, este poderá gerar um sinal, portanto, é imprescindível que a carga seja desligada primeiro, depois o sensor. Caso haja linhas de alta tensão ou cargas de alta potência perto dos cabos do sensor, é recomendado que os coloque dentro de um duto de metal para evitar possíveis interferências.

A montagem mecânica é simples e prática, o sensor possui o corpo rosqueado e acompanha duas porcas para fixação. O local escolhido deve ser de modo que o alvo passe pelo sensor, sem colidir, como é mostrado na Figura 2.7 a seguir.

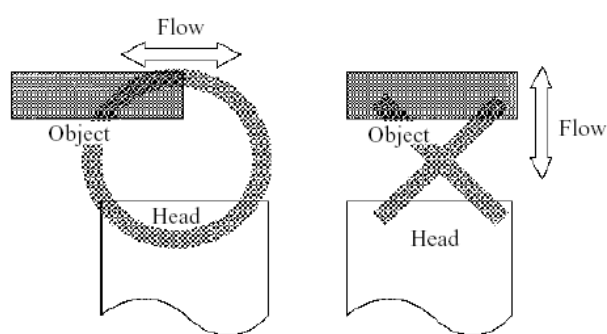


Figura 2.7 – Movimentação do alvo em relação ao sensor. (Fonte: [6])

Sensor de contato

O sensor de contato, também chamado de sensor de fim de curso é amplamente utilizado em máquinas que possuem partes móveis e que devem ser controladas com relação ao curso. Funcionam como chaves que fecham ou abrem o circuito quando detectado o contato. São compostas por atuador, cabeça, bloco de contato, bloco de terminais, corpo da chave e base. A Figura 2.8 mostra um exemplo desse tipo de sensor e seus componentes.

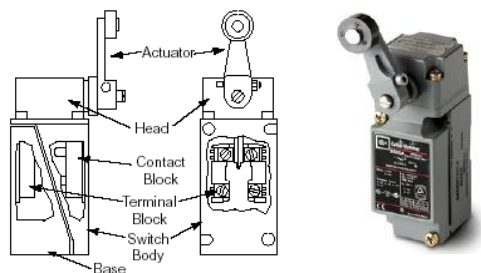


Figura 2.8 – Representação do sensor de contato. (Fonte: [6])

Sensor hall

Nesse tipo de sensor, semelhantemente ao sensor indutivo, não necessita de contato com o alvo para detecta-lo, porém, o alvo deve ser magnético. Com isso, o sensor faz a leitura do campo magnético próximo a ele e detecta o alvo.

Esse tipo de sensor está sendo utilizado para detecção dos fins e meio de curso do pistão. A grande vantagem deste, é que a fixação é muito mais fácil que outros e também a compatibilidade do pistão com esse sensor.

2.4. SISTEMA PNEUMÁTICO

2.4.1. Válvulas pneumáticas

A válvula é um dos principais componentes do circuito pneumático, possui a função de controlar a direção, pressão ou vazão do ar comprimido. Em geral são classificadas pelos seguintes tipos de válvulas: direcionais; de bloqueio; reguladoras de fluxo; reguladoras de pressão.

As válvulas direcionais podem ser acionadas de diferentes maneiras, como por exemplo, utilizando o próprio ar comprimido, botão físico ou de modo elétrico, por meio de solenoides.

2.4.2. Atuador pneumático

Os atuadores pneumáticos são classificados em atuadores lineares ou atuadores rotativos. As principais características dos atuadores pneumáticos são:

- Suscetíveis à compressibilidade do ar (aumento do tempo de resposta para pressões elevadas)
- Não há precisão na parada em posições intermediárias;
- Apresentam uma favorável relação peso/potência;
- Dimensões reduzidas;
- Segurança à sobrecarga;
- Facilidade de inversão;
- Proteção à explosão.

Os atuadores lineares são sub classificados em vários tipos, porém no presente projeto será analisado o de dupla ação, que é um dos mais utilizados, pois possui inúmeras aplicações, como prensas, fixadores e outros.

A Figura 2.9 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e características construtivas. A atuação é feita por ar comprimido nos dois sentidos. Entre as suas características temos:

- Atuação de força nos dois sentidos, porém com força de avanço maior do que a de retorno, enquanto a velocidade de retorno é proporcionalmente maior que a de avanço;
- Não permite cargas radiais na haste;
- O projeto deve basear-se em esforços de flambagem;

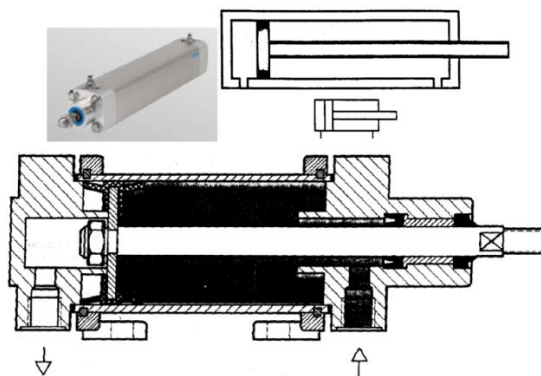


Figura 2.9 – Pistão de dupla ação. (Fonte: [7])

2.4.3. Reservatório de ar

Ao falar que o sistema é pneumático, logo temos que considerar uma fonte de gás pressurizado, em outras palavras, compressor e reservatório. Além disso, pelo requisito listado anteriormente em que o sistema deve ser independente de fontes externas, é necessário um segundo reservatório, com capacidade volumétrica suficiente para fornecer pressão ao sistema durante os ciclos de trabalho.

Além de fornecer a capacidade de ar comprimido para o sistema, também destacam-se as funções de amortecer as oscilações da tubulação de descarga estabilizando a pressão do sistema; serve como reservatório para fornecer pressão para consumos repentinos, que o compressor não atenderia; reduz ou elimina a operação de carga do compressor. (BUCK, 2004)

Juntamente com o reservatório, estará localizado o manômetro, utilizado para verificar a pressão do reservatório e detectar uma possível falta de ar ou alta pressão no sistema. Além disso haverá uma válvula de segurança caso a pressão ultrapasse a estabelecida como máxima, liberando a pressão excedente. Isso é importante devido a uma possível colisão do carro, podendo afetar o volume do reservatório ou mesmo o aquecimento do mesmo o aumento da pressão devido a radiação térmica do motor e escapamento.

Capítulo 3 – CONCEPÇÃO, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão detalhados os componentes utilizados para o projeto, bem como suas vantagens, desvantagens, algumas especificações técnicas e a concepção do projeto.

3.1. CONCEPÇÃO DO PROJETO

Este projeto será constituído por dois sistemas, um elétrico e outro pneumático. O primeiro será responsável pelo controle do acionamento das válvulas pneumáticas e o segundo pela transferência de força mecânica para a alavanca de câmbio.

O controle do sistema elétrico será realizado por um Atmega 328 PU, que passará os comandos digitais para o chamado sistema de potência ou circuito de potência, que em seguida comandará o sistema pneumático. A Figura 3.1 mostra as interações entre os sistemas:

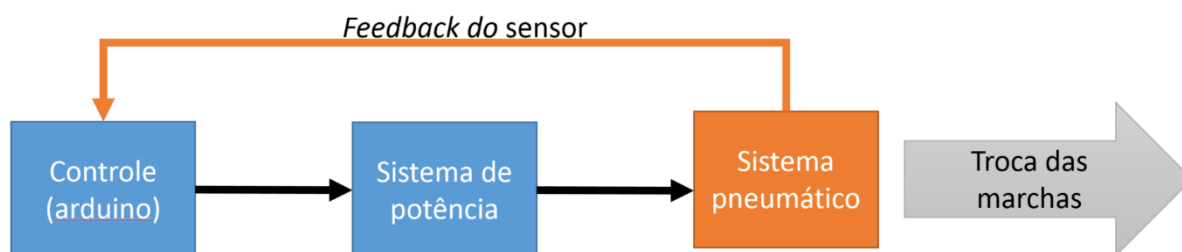


Figura 3.1 – Diagrama de interação entres os sistemas.

A troca de experiência com outras equipes de FSAE, nacionais e internacionais, resultaram em uma sequência de requisitos gerais que os sistemas devem atender. Além de ser fácil para o usuário (piloto) utilizá-lo e também podendo desligar os sistemas, ou seja, haverá duas opções para realizar a troca de marcha, um automatizado e outro manual. Em seguida, estão listados os requisitos do sistema automatizado:

- Rapidez:
 - As trocas devem ocorrer de modo rápido.
- Robustez:
 - Por se tratar de um sistema que será instalado no carro, ele deve ser capaz de suportar vibrações, calor e até mesmo resistência à chuva.

- Segurança:
 - Considerando um sistema com reservatório de ar comprimido, todos os componentes devem ser validados e dimensionados corretamente.
- Confiabilidade:
 - O projeto deve ser testado exaustivamente, já que se trata de um ponto importante do carro.
- Independência do sistema manual:
 - Caso o piloto queira realizar a troca de marcha de modo manual, o sistema automatizado não deve interferir ou impedir a troca.

Além disso, os sistemas devem cumprir os requisitos mecânicos em relação aos esforços que deverão ser aplicados para que a automatização seja realizada corretamente.

Para coletar os dados das condições de contorno do projeto, foi utilizado um medidor de ângulo acoplado na haste do câmbio para determinar o deslocamento angular necessário e uma balança de carga, que forneceu a força necessária para que ocorresse a troca de marcha. A Figura 3.2 mostra o sistema manual instalado no carro atualmente. A troca de marcha é feita pelo piloto, através de uma alavanca, posicionada no *cockpit*, ligada por meio de cabo de aço ao câmbio.



Figura 3.2 – Alavanca de câmbio para realizar trocas manuais.

Os atuadores devem aplicar o torque aproximado de 7,6 N.m no eixo, para realizar a troca. Além desse torque, também será necessário haver um deslocamento angular entre 10° e 15° para ambos os lados.

Imagens do sistema manual instalado no carro estão no Apêndice I para melhor visualização do contexto.

3.2. MATERIAIS

Nessa seção serão especificados os componentes utilizados no projeto, bem como suas características e a justificativas da escolha dos mesmos.

3.2.1. Pistão pneumático

A escolha do tipo de atuador dependerá do circuito pneumático. Neste projeto será apresentado dois modelos de circuitos pneumáticos, que serão detalhados mais à frente. Porém ambos utilizam o mesmo tipo de atuador pneumático. A Figura 3.3 mostra a primeira opção de circuito, que não possibilita a troca manual (*backup manual*).

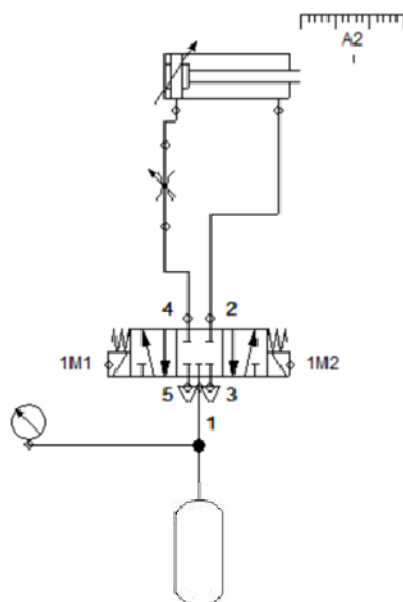


Figura 3.3 – Circuito pneumático sem o *backup manual*.

O atuador escolhido por membros da equipe anteriormente foi o modelo de dupla ação com um curso de 100 mm e diâmetro do eixo de 4 mm, modelo DSNU-10-100-P-A Festo.

Com o avanço do projeto, verificou-se que a força máxima exercida pelo pistão, em uma pressão de trabalho de 6 bar, seria inferior ao necessário para acionamento da troca de marcha. Para solucionar esse problema, esse atuador deveria ser posicionado de modo a

possibilitar a aplicação de um mecanismo de alavanca. Contudo vale salientar que esse pistão está sujeito a fletir mais facilmente do que outros modelos que podem ser aplicados para essa tarefa.

Devido ao longo curso de 100 mm desse modelo de pistão e ao diâmetro da haste de 4 mm a força axial pode causar a quebra do pistão, podendo fletir. Por isso se recomendou a aplicação de outro tipo de pistão que possua curso menor e diâmetro da haste maior.

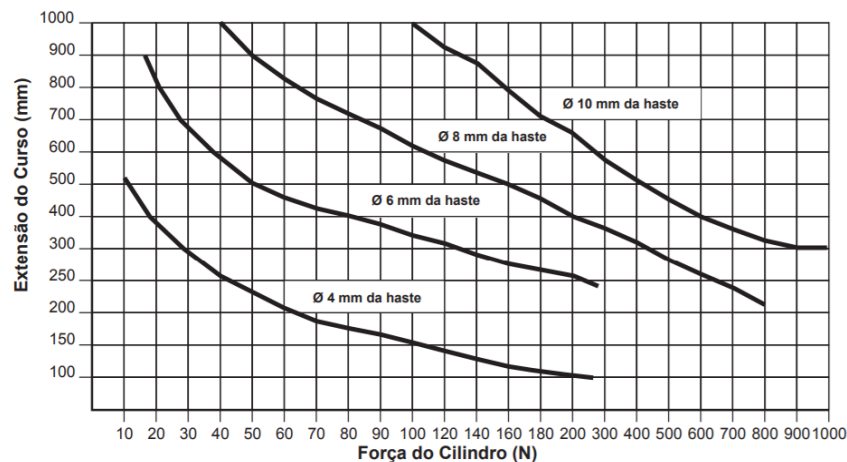


Figura 3.4 – Gráfico de flambagem da haste, diâmetro da haste = f (curso x força).
(Fonte [8])

Por meio da Figura 3.4 podemos verificar que a haste de 4mm de diâmetro com curso de 200 mm (comprimento do pistão estendido) suporta até 60 N de força axial. Como foi verificado no item 3.1, anteriormente, o torque necessário para que ocorra a troca de marcha é de 7 N.m. Ou seja, seria necessário adicionar uma alavanca de câmbio de 116 mm para obter esse torque com a força máxima que o pistão suporta.

Essa estratégia de adaptar o pistão ao carro foi descartada, pois é pouco confiável e necessitava de uma alavanca relativamente grande, que não caberia no espaço disponível no carro.

Por isso, decidiu-se realizar novamente o dimensionamento de outro pistão com características mais apropriadas para esse projeto, que são:

- Curso entre 20 e 50 mm
- Êmbolo magnético
- Dupla ação

O curso entre 20 e 50 mm se mostrou mais adequado para ser utilizado no espaço limitado que era disponível no carro. Já o êmbolo magnético dá a possibilidade para a utilização do sensor hall.

Para realizar o dimensionamento e determinar o diâmetro mínimo do atuador, foi utilizado o critério de Euler, conforme Equações (3.1) e (3.2).

$$K = \frac{\pi^2 \cdot E_m \cdot J}{\lambda^2} \quad (3.1)$$

$$J = \frac{dh^4 \cdot \pi}{64} \quad (3.2)$$

Em que:

- K = força de flambagem [N]
- E_m = Módulo de elasticidade [N/m²]
- J = Momento de inércia para seção circular [m⁴]
- λ = Comprimento de flambagem [m]

Com o critério de Euler é possível determinar a força de flambagem de uma haste com seção circular, com isso podemos verificar a força máxima que o pistão pode ser submetido. Isso significa que caso essa força exercida pelo pistão seja igual a K ele estará submetido a força máxima, o que poderá danificar este componente. Portanto é acrescido o fator de segurança, S que será de 3,5, valor sugerido em projetos de pneumática e hidráulica. Portanto temos que:

$$Fa = \frac{K}{S} \quad (3.2)$$

Fa é a força máxima exercida pelo pistão, que será menos do que a força de flambagem do componente. Com isso garantimos que o pistão sempre estará atuando em força 3,5 vezes menor do que a força de flambagem.

Para determinar o diâmetro da haste do pistão, temos a Equação 3.3:

$$dh = \sqrt[4]{\frac{64 \cdot S \cdot \lambda^2 \cdot Fa}{\pi^3 \cdot E_m}} \quad (3.3)$$

Em que dh é o diâmetro da haste em metro. O tipo de fixação do atuador e da carga são fatores que alteram o resultado do dimensionamento do cilindro. Por exemplo, se a carga é guiada, o diâmetro da haste será menor do que para a mesma carga não guiada. Para isso temos os seguintes casos, mostradas na Figura 3.5.

Cargas de Euler				
Carga de Euler	Caso 1 Uma extremidade livre, a outra fixa.	Caso 2 (Caso básico) Duas extremidades articuladas	Caso 3 Uma extremidade articulada e outra fixa.	Caso 4 Duas extremidades fixas.
Representação Esquemática				
Comprimento Livre de Flambagem				
	$\lambda = 2L$	$\lambda = L$	$\lambda = L (0,5)^{0,5}$	$\lambda = L/2$
Situação de Montagem para Cilindros Hidráulica				

Figura 3.5 – Casos de fixação do atuador e da carga para determinar λ . (Fonte [9])

No caso desse projeto, temos as seguintes características:

- Carga guiada
- 2 extremidades articuladas

Portanto no caso, é semelhante ao Caso 2. Adotaremos então o valor de $\lambda = L$. Porém, também será calculado para o Caso 1, já que existe folga no guia da carga, aumentando as forças radiais no atuador.

Para determinar o diâmetro mínimo da haste, foram analisados os seguintes fatores:

- Força necessária para atuação da marcha
- Deslocamento angular
- Deslocamento linear
- Limites físicos de comprimento do atuador

A força necessária para troca de marcha, como descrito anteriormente, foi medida através de um dinamômetro. Com isso obtivemos a primeira variável, Fa . Para um torque de 7,6 N.m a uma distância de 50 mm do eixo de rotação fornece uma força de compressão de 152 N. Ou seja, o pistão deve fornecer 152 N em uma alavanca de 50 mm para que resulte em um torque de 7,6 N.m.

A distância de 50 mm de alavanca é outra variável que foi definida levando em consideração os três últimos fatores da lista acima e será explicado no capítulo seguinte, em análise cinética do projeto. A Figura 3.6 mostra as cotas do sistema do pistão estendido com a alavanca de 41 mm.

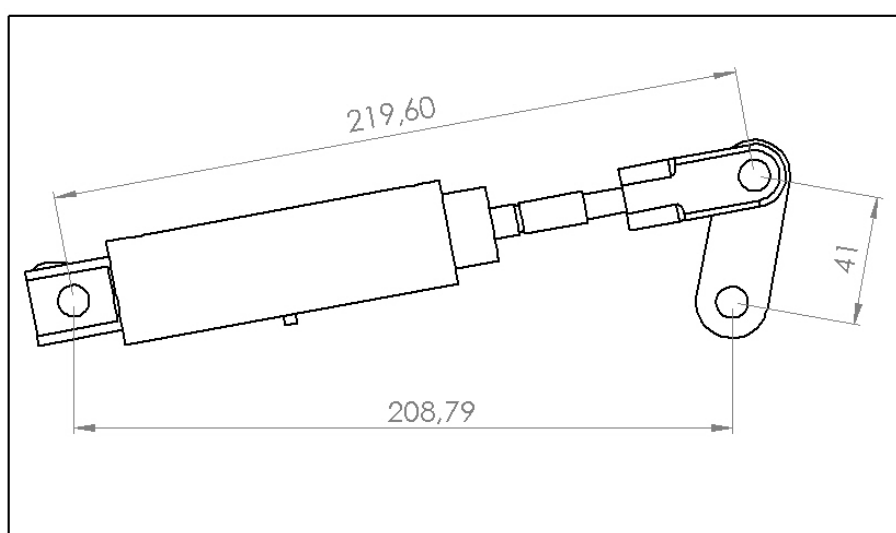


Figura 3.6 – Cota do pistão estendido, com braço de alavanca de 41 mm (Unidades em mm).

A Tabela 3.1 a seguir mostra todos os dados que serão necessários para o dimensionamento do diâmetro da haste, o tamanho L de 219,6 mm foi aproximado para 300 mm.

Tabela 3.1 – Variáveis, valores e unidades, utilizados no dimensionamento do diâmetro mínimo da haste.

Variável	Valores	Unidades
S	3,5	-
Fa	152	N
L	0,3	m
Em (Aço 1020)	2E11	N/m ²

Com essas informações e para determinar o diâmetro da haste do pistão, temos a Equação 3.3 em que foi determinado o diâmetro mínimo da haste. A Tabela 3.2 mostra os resultados dos diâmetros mínimos para os casos 1 e 2. O desenvolvimento do cálculo está disponível no Anexo II.

Tabela 3.2 – Diâmetro mínimo da haste para os casos especificados na Figura 3.5.

Caso	Diâmetro mínimo
Caso 1	6,6 mm
Caso 2	4,7 mm

Portanto, a haste deve possuir pelo menos 6,6 mm de diâmetro. Fazendo uma comparação com as empresas e verificando os modelos disponíveis no mercado e seus valores, foi escolhido um atuador com curso de 30 mm e diâmetro da haste de 12 mm. Havia a possibilidade de compra de um pistão de 8 mm, mais próximo ao diâmetro dimensionado, porém devido à pequena diferença de preço entre os dois, foi escolhido o de 12 mm.

A Tabela 3.3 mostra algumas características do pistão DSNU-10-100 da Festo e do pistão da Werk-Schott modelo CWMI 0307825x030, que foi o selecionado através do Critério de Euler e pela disponibilidade e valor no mercado.

Tabela 3.3 – Características dos pistões.

Pistão	Diâmetro da haste	Força teórica (6 bar)	Curso	Consumo de ar [l/seg]	Ação
CWMI 0327825x030	12 mm	294-247 N	30 mm	0,33 l	Dupla

É esperado que a troca de marcha aconteça rapidamente, porém com baixa frequência. Para analisar a vazão foi considerado que o ciclo poderá acontecer a 3 ciclos por segundo. Com isso temos que a vazão por minuto será de 7,2 l/minuto para o pistão da Festo e 19,8 l/minuto para o pistão da Werk-Shott. Essas informações serão essenciais para o dimensionamento das válvulas. A Tabela 3.4 apresenta as informações sobre o atuador com diâmetro do cilindro de 32 mm. Essas informações serão utilizadas para dimensionamento do reservatório de ar.

Tabela 3.4 – Informações dos atuadores CWMI – Werk-Schott. Diâmetro de 32 escolhido para o projeto.

FORÇAS TEÓRICAS (N)					
Diâmetro do Cilindro (mm)	Diâmetro da Haste (mm)	Área Efetiva (mm ²)		Força Teórica A 6 bar (N)	
		Avanço	Retorno	Avanço	Retorno
8	4	50,26	37,7	30,16	22,61
10	4	78,54	65,98	47,12	39,59
12	6	113,10	84,82	67,85	50,89
16	6	201,06	172,79	120,64	103,67
20	8	314,16	263,89	188,50	158,33
25	10	490,87	412,33	294,52	247,40
32	12	804,24	726	482	435,6
40	16	1256,64	1143,54	754	686

3.2.2. Sistema de controle e sensoriamento

O sistema de controle será implementado por meio de um microcontrolador programável Atmega 328 PU, utilizado no Arduino Uno. Possui 14 entradas/saídas digitais e 6 entradas/saídas analógicas. Portanto poderá obter dados dos diversos sensores, tanto os que serão aplicados neste projeto quanto possibilita a compatibilidade de sensores para projetos futuros. É um sistema facilmente reprogramável, que atende aos requisitos de processamento e entradas e saídas digitais. A Figura 3.7 mostra um exemplar deste componente.

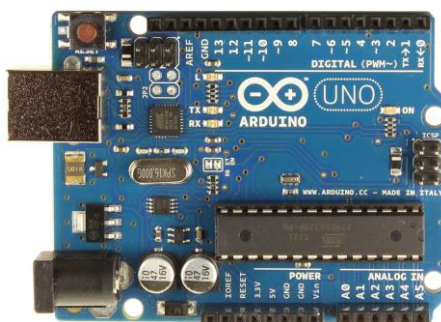


Figura 3.7 – Arduino Uno.

Este componente terá como sensores os seguintes elementos:

- Sensores magnéticos;
- Fim de curso direito no volante (borboleta direita)
- Fim de curso esquerdo, no volante (borboleta esquerdo)

Os sensores magnéticos serão os responsáveis pela detecção do fim de curso e meio de curso de pistão pneumático. Por se tratar de um pistão que possui o êmbolo magnético, é

possível anexar os sensores ao redor do pistão, de modo que o sensor detecta o êmbolo quando este esteja próximo.

Esse tipo de sensor foi escolhido pois apresenta grande flexibilidade para mudança do posicionamento no pistão e por ser resistente. Porém não apresenta uma precisão grande, isso devido ao campo magnético do êmbolo, que proporciona uma faixa em que o sensor detecta o alvo ao invés de um único ponto. A Figura 3.8 mostra esse tipo de sensor.



Figura 3.8 – Sensor magnético para pistão com êmbolo magnético.

3.2.3. Sistema de potência

O sistema de potência será responsável pelo acionamento dos atuadores, tanto dos solenoides da válvula pneumática quanto dos solenoides de alta potência da troca de marcha. O MOSFET escolhido para esse processo foi o IRF 540, já que possui uma capacidade de 17 amperes. Esse componente foi escolhido pois consegue fornecer a potência necessária para alimentar a maior carga do carro, que é a bomba de combustível (90 W). Ou seja, a maior carga do carro necessita de 7,5 A, aproximadamente, quando está em regime permanente. A corrente de pico dessa carga não é conhecida, porém para garantir que o sistema de potência não seja comprometido durante o período transitório foi adicionado fusíveis de 10 amperes na entrada de cada MOSFET. A Figura 3.9 mostra o MOSFET IRF 540 e seu datasheet está disponível nas Referências Bibliográficas [10].



Figura 3.9 – MOSFET IRF 540. (Fonte: [10])

Outra abordagem do sistema de potência é a utilização de relés, ao invés de transistores. As vantagens são que são mais baratos, contudo a frequência máxima de trabalho é muito menor que a dos MOSFETs. A Figura 3.10 mostra um módulo de relés, compatíveis com micro controladores.

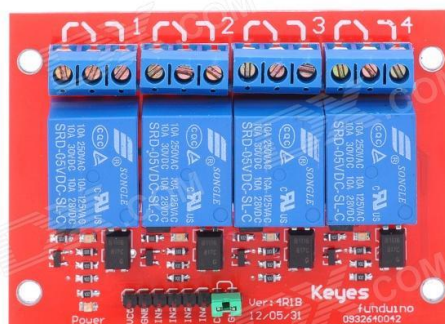


Figura 3.10 – Módulo de relés.

Tabela 3.5 – Comparação entre relé e MOSFET.

Componente	Corrente máxima	Frequência máxima
MOSFET IRF540	17 A	4 MHz
Relé Isso 9002	7 A	10 Hz

A Figura 3.11 mostra o esquemático de cada unidade de relé, para ser acionado com uma entrada digital de baixa tensão, como é a do Arduino.

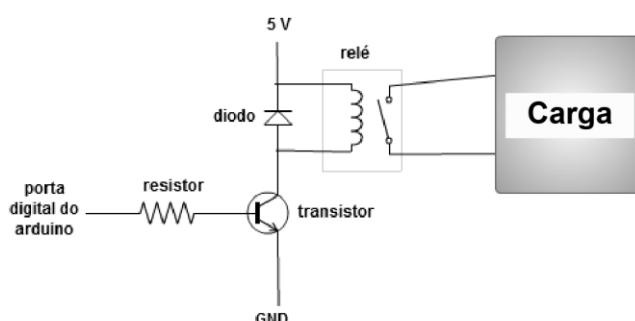


Figura 3.11 – Esquemático para acionamento de relé, a partir do Arduino.

No esquemático mostrado na figura acima, também apresenta um transistor que é responsável pelo acionamento do relé, a principal diferença para o transistor mostrado anteriormente é a corrente de trabalho, sendo que a corrente de trabalho para acionar o relé é muito menor do que o de acionamento do solenoide.

3.2.4. Reservatório de ar comprimido

Este componente é o responsável por manter as linhas pressurizadas e fornecer a pressão pneumática no atuador, percorrendo antes as válvulas.

O dimensionamento do reservatório é extremamente importante para garantir que o sistema pneumático seja alimentado durante todo o processo que necessitará dele.

Contudo a limitação financeira nos fez utilizar um reservatório que já estava disponível para a utilização neste projeto. A mostra as características deste reservatório

	Valor	Unidade
Capacidade volumétrica	0,750	Litro
Pressão máxima	3000	Psi
Material	Alumínio	-
Peso vazio	1,300	kg

Tabela 3.6 – Características do reservatório.



Figura 3.12 – Reservatório de ar comprimido com manómetro e válvula de segurança.

Utilizando a área efetiva de avanço do atuador, que é de 804,24 mm² (Tabela 3.4), portanto o volume de ar para cada ciclo será dado pelo deslocamento (15 mm) vezes a área efetiva do êmbolo. Portanto temos que o consumo volumétrico por ciclo é de:

$$804,24 \text{ mm}^2 * 15 \text{ mm} = 12063,6 \text{ mm}^3 = 0,012063 \text{ l} \quad (3.4)$$

Considerando o tempo de volta das três melhores equipes, na competição de 2017, temos que cada volta do percurso levou, em média 1:08 minutos. Portanto vamos considerar que o tempo de percurso da equipe Apuama seja 1:20 minutos. Além disso sabemos que o percurso será completo após a 22ª volta. Com essas informações e com a

Equação 3.4 podemos obter o volume (em litros) consumido pelo sistema durante toda corrida através da Equação 3.5.

$$n * tempo_{total} * C = V_{total} \quad (3.5)$$

Em que n é o número de trocas por segundo, estipulado em 3. Já $tempo_{total}$ é o tempo total da corrida em segundos, C é o consumo em litro/segundo e V_{total} será o volume total consumido pelo sistema em litros.

$$3 \frac{ciclos}{segundo} * 1760 segundos * 0,012063 \frac{litro}{ciclo} = 63,7 litros \quad (3.6)$$

Portanto temos que:

$$V1 - V2 = 63,7 l \quad (3.7)$$

Onde $V1$ e $V2$ são os volumes para a pressão ambiente de 1 bar e V_{res} é o volume do reservatório, determinados pela Equação 3.8 e Equação (3.9) a seguir:

$$V1 * 1 bar = 206 bar * V_{res} \quad (3.8)$$

$$V2 * 1 bar = (1 + 6) bar * V_{res} \quad (3.9)$$

Substituindo as Equação (3.7) e Equação (3.8) na Equação (3.9) temos que:

$$V_{res} = \frac{63,7}{199} = 0,32 litro \quad (3.10)$$

Por fim, adicionando um fator de segurança em que, ao fim da competição tenha sido gasto 80% do da capacidade do reservatório temos que o volume do reservatório (V_{res+}) será:

$$V_{res+} = \frac{V_{res}}{0,8} = \frac{0,32}{0,8} = 0,4 litros \quad (3.11)$$

Portanto, o reservatório que será utilizado neste projeto está superdimensionado em 1,875 para as condições estipuladas. Portanto é possível a redução do reservatório em projetos futuros.

3.2.5. Válvula pneumática

As válvulas que serão utilizadas para esse projeto serão do tipo 3/2 acionadas por meio de solenoides e retorno por mola. Esse modelo específico, que será detalhado mais adiante, foi escolhido de modo que cumpra o requisito de independência entre os sistemas manuais e automático.

Outra grande vantagem desse tipo de válvula é que a tensão de trabalho do solenoide é compatível com a tensão da bateria do carro, portanto dispensa qualquer tipo de tratamento de corrente e tensão.

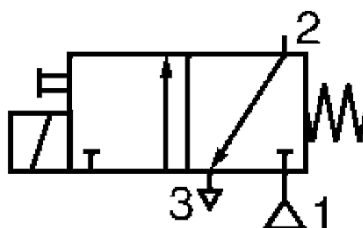


Figura 3.13 – Esquemático da válvula.

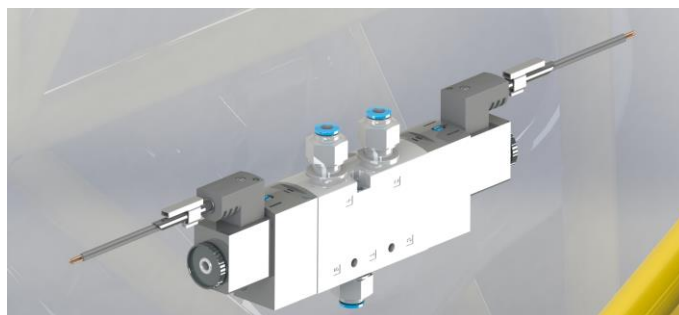


Figura 3.14 – Válvula modelo VUVS-L25-P53C-MZD-G14-F8.

Tabela 3.7 – Características da válvula VUVS-L25-P53C-MZD-G14-F8.

Características	VUVS-L25-P53C-MZD-G14-F8
Função da válvula	3/2 vias fechada
Tipo de acionamento	Elétrico
Vazão a 7 bar	5620 l/minute
Tipo de retorno	Mola mecânica

O dimensionamento da válvula com relação à capacidade de vazão foi considerado, de modo que ela consiga fornecer e receber todo o fluxo de ar que flui no sistema, sem que haja resistências indesejáveis.

A Tabela 3.3 mostra a vazão do pistão CWMI que é de 0,33 litro/segundo, já a vazão da válvula é de 93,6 litros/segundo, portanto a válvula não proporcionará resistências para o fluxo de ar comprimido.

Capítulo 4 - PROJETO E RESULTADOS

4.1. SISTEMA PNEUMÁTICO

4.1.1. Análise Cinemática

Por se tratar de um mecanismo que deve fornecer um movimento rotativo através do deslocamento linear, podemos assemelhar esse mecanismo ao de um sistema Biela-Manivela. A Figura 4.1 mostra o exemplo desse mecanismo:

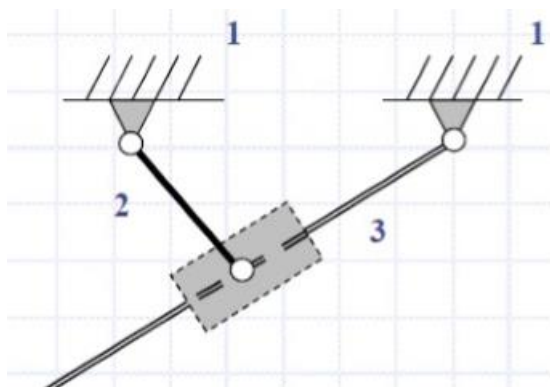


Figura 4.1 – Exemplo do mecanismo biela-manivela.

A numeração da Figura 4.1 representa a numeração das barras, que será utilizado posteriormente.

Passando para o projeto do sistema, a barra 3 representa o atuador pneumático, já a barra 2 representa a alavanca de câmbio e 1 é a barra imaginária dos pontos de fixação. A Figura 4.2 mostra o mecanismo com os componentes do projeto.

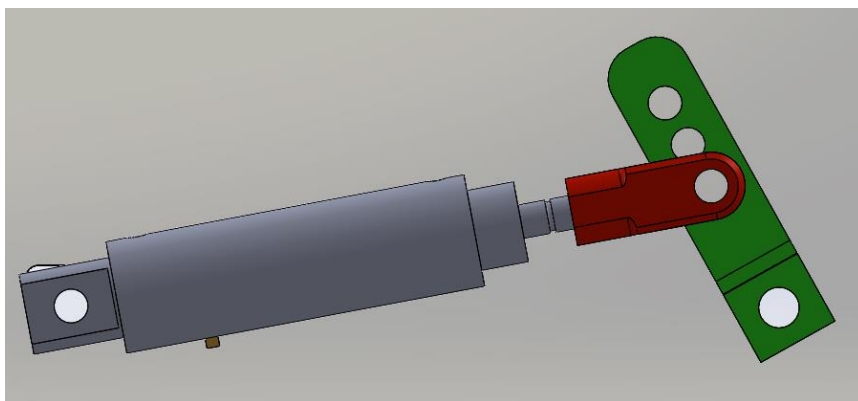


Figura 4.2 – Modelo 3D dos componentes para o estudo cinemático.

Nesta montagem, existem 3 componentes principais. O primeiro é o atuador pneumático, acoplado na alavanca de câmbio e para manter tudo isso fixo tem uma base de

cor cinza claro. A alavanca possui 3 níveis de regulação para fixação do atuador. Com isso é possível realizar um ajuste menos preciso. Nesse tipo de mecanismo é muito importante identificar a relação entre deslocamento linear do atuador e o deslocamento angular da alavanca de câmbio, por isso foi simulado em software essa relação, para cada caso. As Figura 4.3 a Figura 4.8 apresentam os resultados do deslocamento linear e angular do sistema.

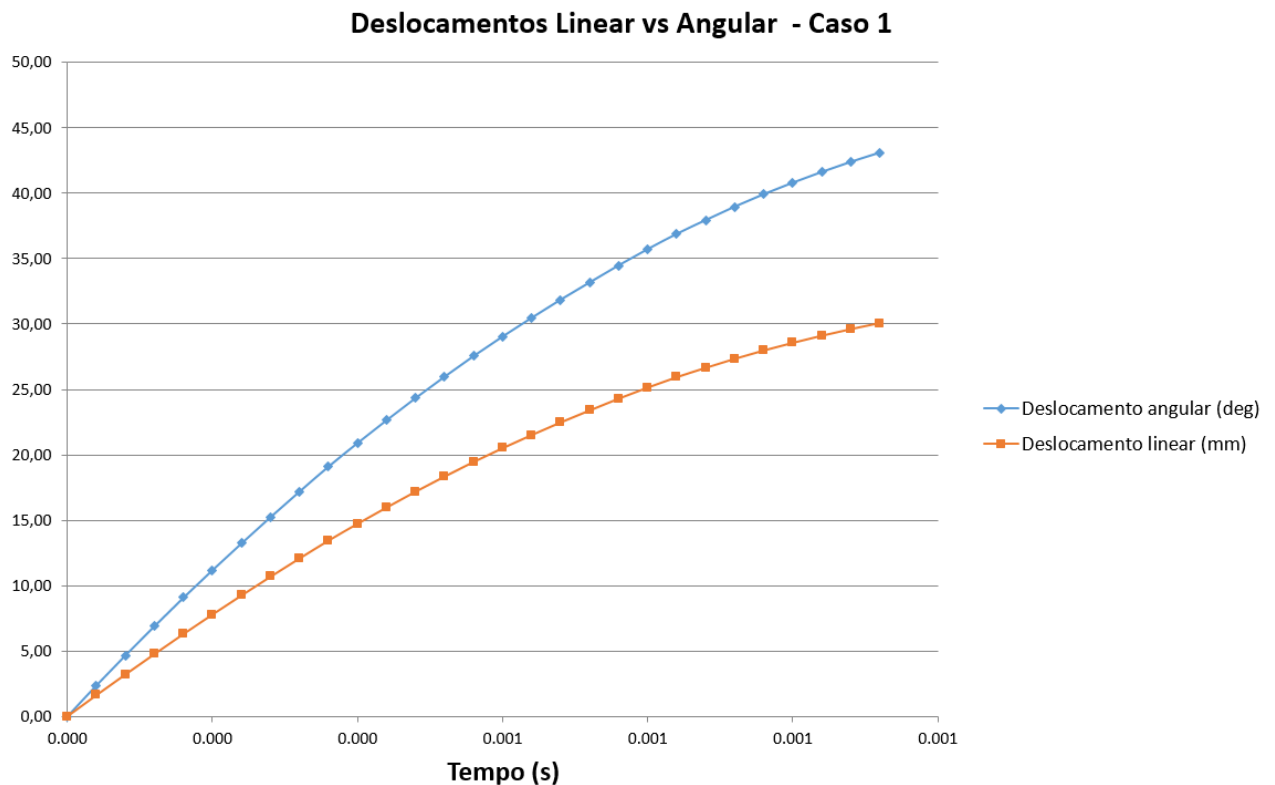


Figura 4.3 – Relação entre deslocamento linear do atuador com o deslocamento angular da alavanca no caso 1, em que a montagem é semelhante à mostrada na Figura 4.4.

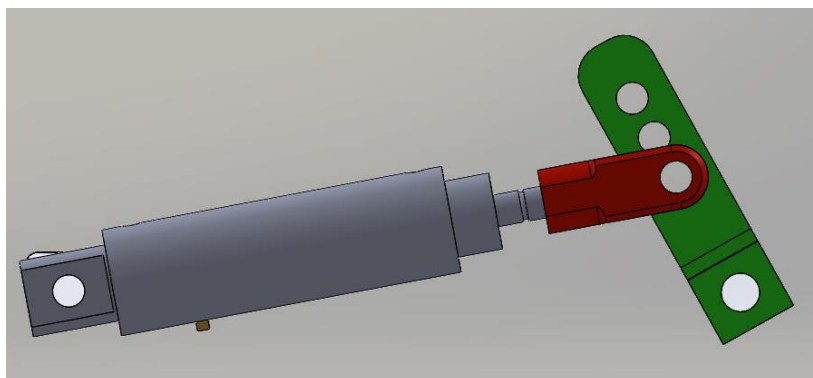


Figura 4.4 – Tipo de montagem para o caso 1.

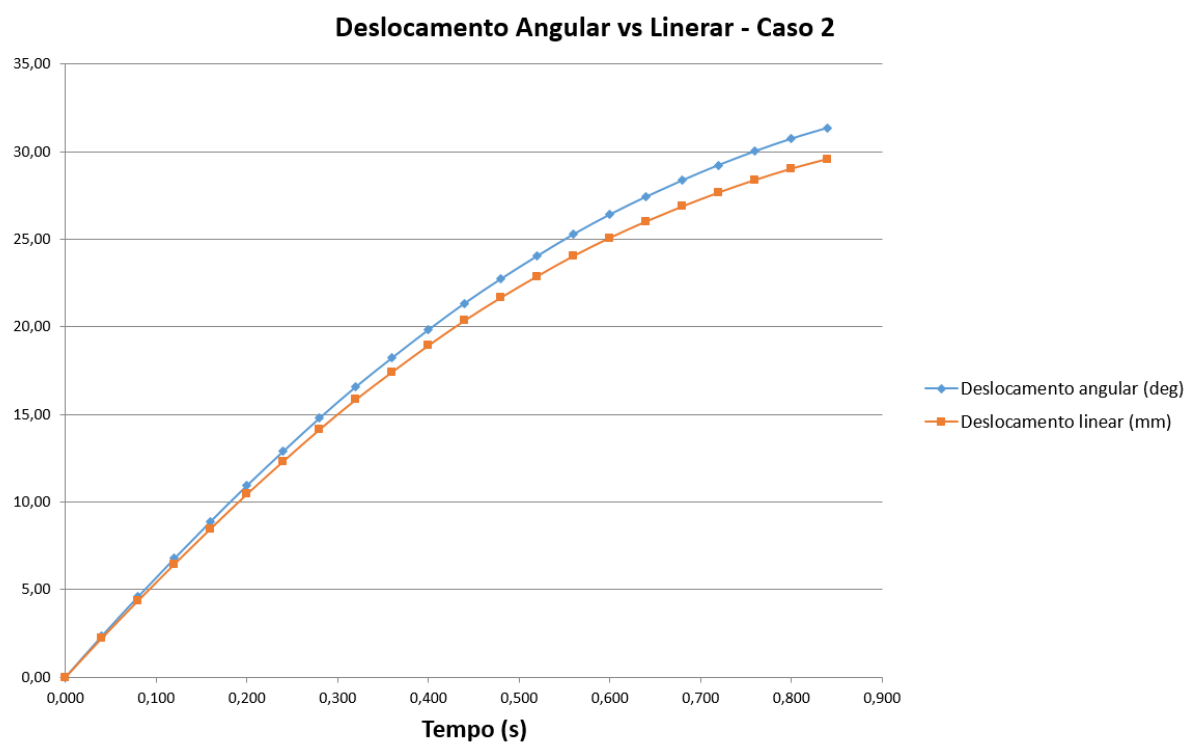


Figura 4.5 – Relação entre deslocamento linear do atuador com o deslocamento angular da alavanca no caso 2, em que a montagem é semelhante à mostrada na Figura 4.6.

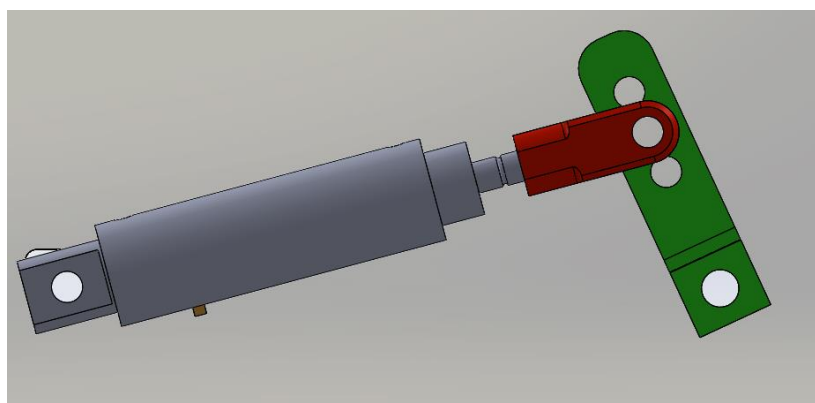


Figura 4.6 – Tipo de montagem para o caso 2.

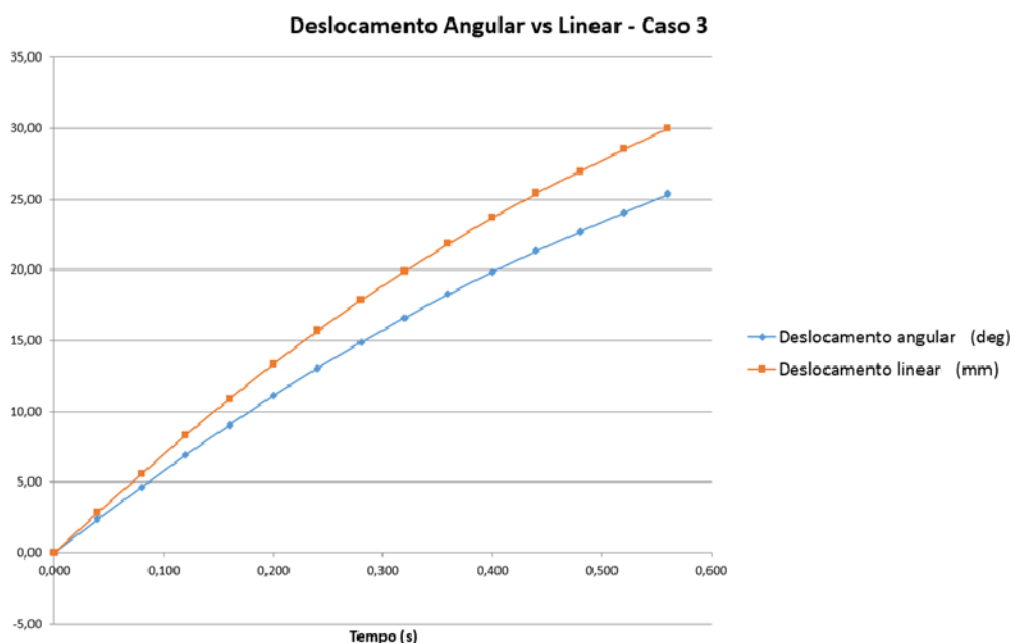


Figura 4.7 – Relação entre deslocamento linear do atuador com o deslocamento angular da alavanca no caso 3, em que a montagem é semelhante à mostrada na Figura 4.8.

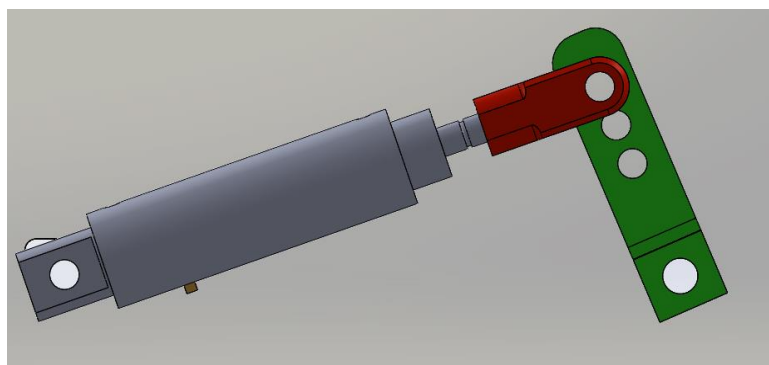


Figura 4.8 – Tipo de montagem para o caso 3.

Com o auxílio dos gráficos é possível verificar que no caso 2 é a posição ótima do sistema, já que o deslocamento angular chega até 30°, aproximadamente, que é o necessário para realizar a troca de marcha nos dois sentidos. Já os outros casos (1 e 3) foram adicionados à alavanca para obter outros possíveis ajustes, caso necessário.

4.1.2. Análise de força e momento

Um dos componentes que será responsável por transmitir a força do pistão para o eixo do câmbio é chamado alavanca de câmbio. O esforço nesse componente será de 350N. Porém foi adotado um fator de segurança de 2, portanto o esforço simulado nessa peça chegou a ser 700 N. A Figura 4.6.1 mostra a simulação o primeiro projeto da peça. Nessa simulação, foi considerado uma face engastada, que é onde será conectada na alavanca de câmbio e a força foi aplicada no furo no meio, sentido para cima.

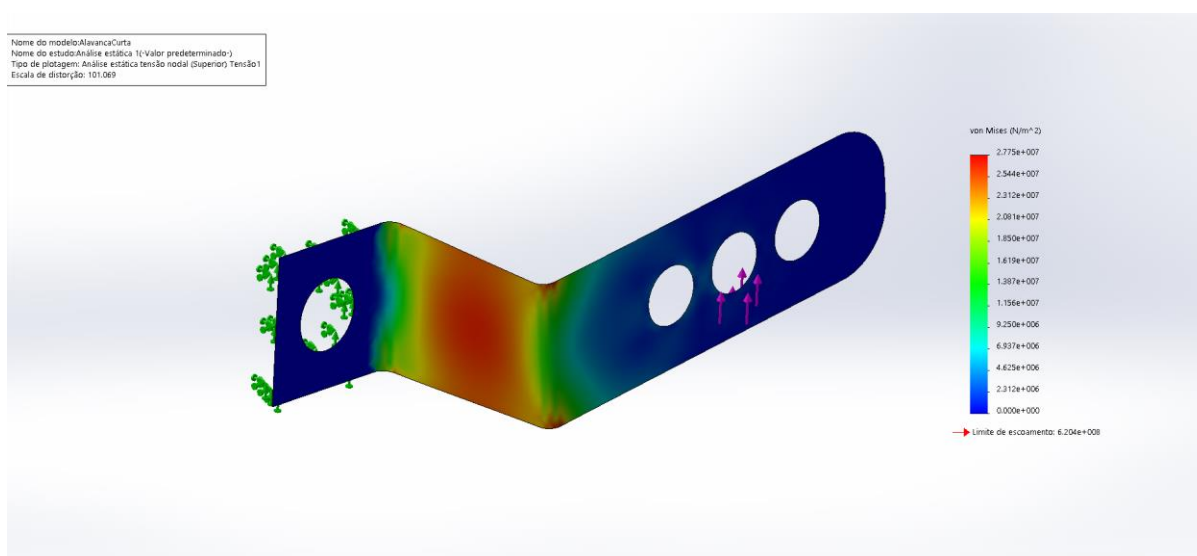


Figura 4.9 – Simulação de esforço da alavanca com 700 N.

É possível verificar que a tensão na peça não chega ao limite de escoamento do aço (6,204 E8), porém houve acumulo de tensão em umas das partes da peça, mostrado em tom mais avermelhado. Para solucionar isso e levando em consideração a fabricação da peça e fixação no carro, foi acrescentado mais uma alavanca em paralelo. A Figura 4.10 mostra o resultado.

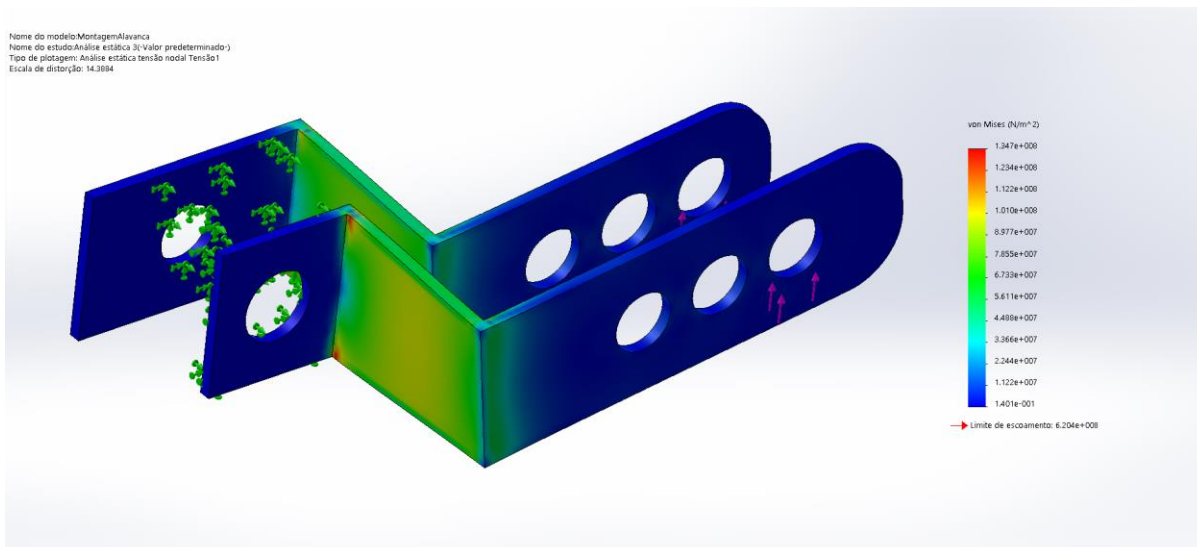


Figura 4.10 – Simulação de esforço da alavanca com 700 N.

Nesse caso, as configurações da simulação foram alteradas para o pior caso. A força está sendo aplicada na última configuração da peça. Isso significa que a peça estará sujeita ao um momento maior do que nas outras configurações. O resultado dessa peça se mostrou melhor do que a Figura 4.9. Porém ainda é perceptível o acúmulo de tensão nasquinas e um desequilíbrio de forças entre as duas peças. Para solucionar isso foram acrescentadas duas ligações entre as alavancas, resultando na simulação da Figura 4.11, a seguir.

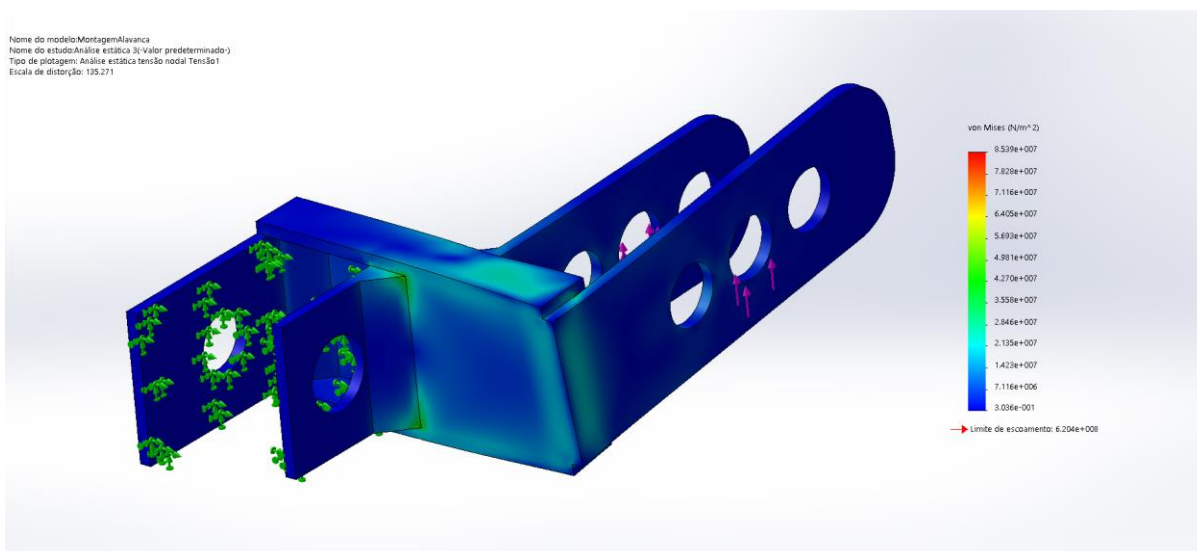


Figura 4.11 – Simulação de esforço da alavanca com 700 N.

Foram adicionadas duas ligações entre as alavancas e chanfros nasquinas, com isso o resultado da simulação aparece com menos acúmulos de tensão nasquinas.

Porém ainda na Figura 4.11, é possível verificar que o limite de escoamento do aço não foi ultrapassado, contudo o gráfico de gradiente mostra uma tensão máxima maior do

que a tensão máxima da Figura 4.10. Isso é explicado pela geometria da peça feita de modo simplificado em CAD que faz criar pontos de singularidade na simulação.

4.1.3. Circuito pneumático

O circuito pneumático foi projetado levando em consideração que o piloto poderá utilizar o sistema manual ou o automatizado. Com isso é muito importante que nem um dos dois sistemas interfiram um no outro.

O projeto inicial utilizou uma válvula 5/3, porém com o avanço do projeto verificou-se que o pistão permanecia pressurizado. Isso implicava que o sistema manual ficaria “travado” enquanto houvesse pressão nas linhas pneumáticas. A Figura 4.12 mostra o sistema nessa configuração.

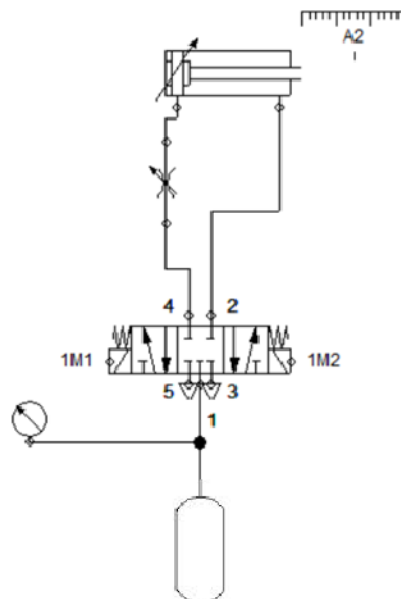


Figura 4.12 – Circuito pneumático utilizando uma válvula 5/3.

Para solucionar isso, foram adotadas duas válvulas 3/2, atuadas por solenoides e com retorno por mola. A diferença principal dessa válvula em relação à anterior é que, quando em repouso (solenóide não está acionado) ela não deixa pressurizado as linhas pneumáticas. Portanto, todo o mecanismo do sistema manual poderá ser acionado sem resistência. A Figura 4.13 mostra o atual circuito pneumático.

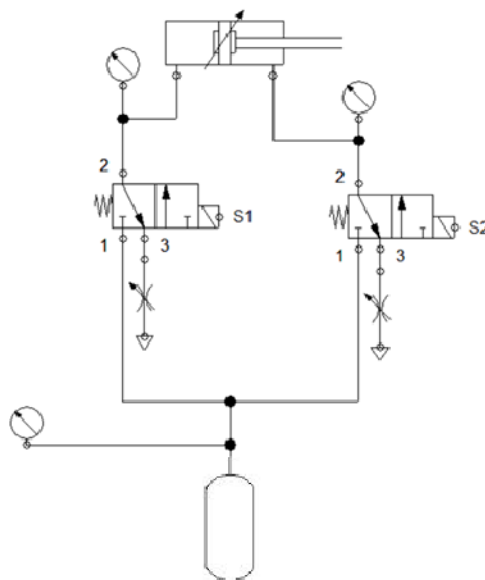


Figura 4.13 – Atual sistema pneumático.

Para verificar o tempo de deslocamento do pistão, foi utilizada a plataforma online da Festo e simulado com componentes similares aos que estão sendo utilizados nesse projeto. As Figura 4.14 e Figura 4.15 mostram a posição e velocidade do pistão e a variação da pressão com o tempo, respectivamente, trabalhando em uma pressão de 4 bar.

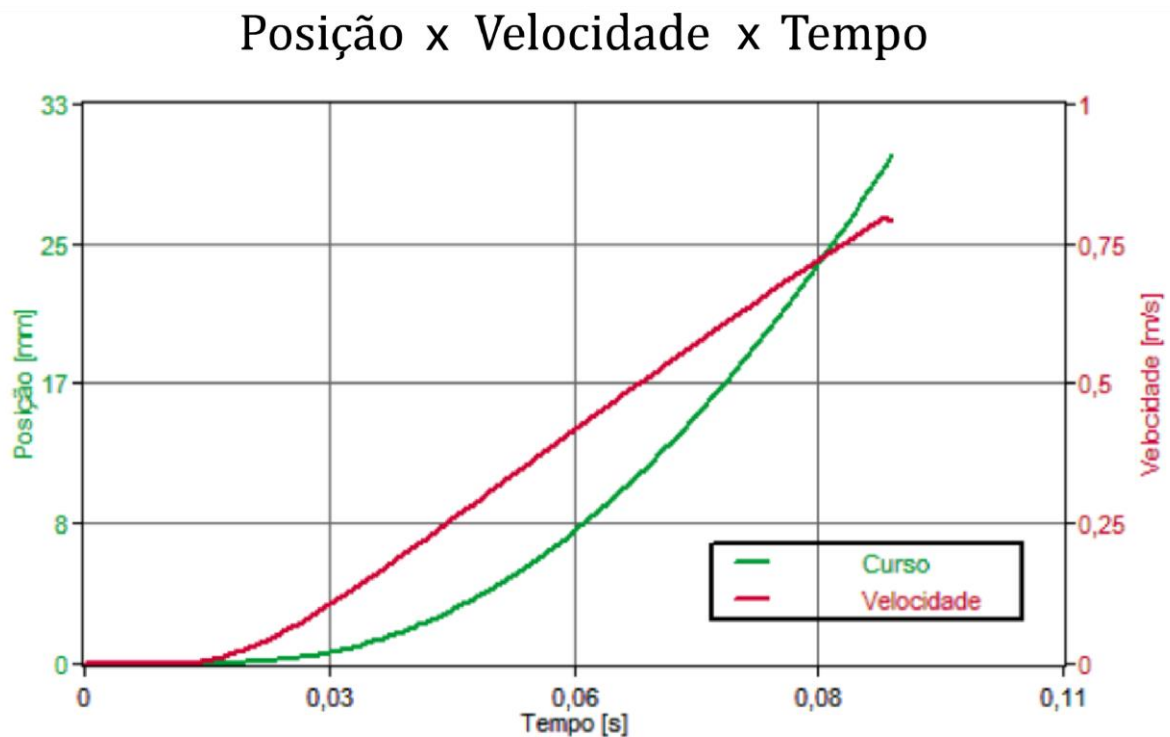


Figura 4.14 – Posição e velocidade em relação ao tempo. Pressão de trabalho de 4 bar.

Através da Figura 4.14 é possível verificar que o tempo de deslocamento total do curso (30 mm) é de 0,09 segundo, aproximadamente. Ou seja, de modo simplificado, o tempo para percorrer meio curso (15 mm) é de 0,045 segundo, aproximadamente. Esse período de tempo é suficiente para realizar a troca de marcha mais rápida se compararmos com o tempo do piloto, que é entre 0,1 e 0,2 segundo

Outra variável importante do projeto é a variação de pressão entre a entrada e a saída do sistema. O projeto pneumático foi montado de modo que os tubos flexíveis pneumáticos tivessem o menor comprimento. Com isso existem menos perdas de pressão na entrada do atuador e menor resistência na vazão do ar nas válvulas. A Figura 4.15 mostra a variação de pressão na entrada e saída do sistema.

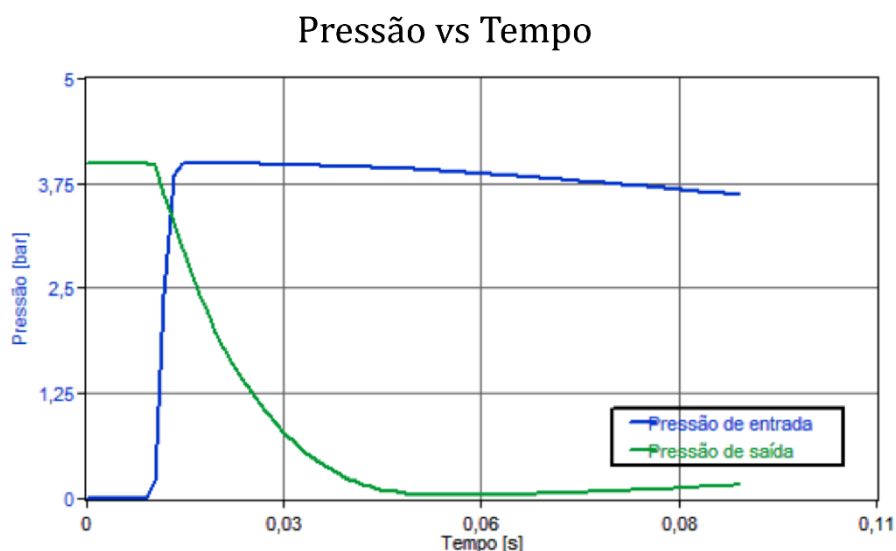


Figura 4.15 – Pressão em relação ao tempo. Pressão de trabalho de 4 bar.

4.2 – SISTEMA DE POTÊNCIA

Como foi indicado anteriormente, esse sistema será o responsável por chavear a tensão de potência da bateria para as válvulas, quando o sinal de troca de marcha for acionado pelo piloto.

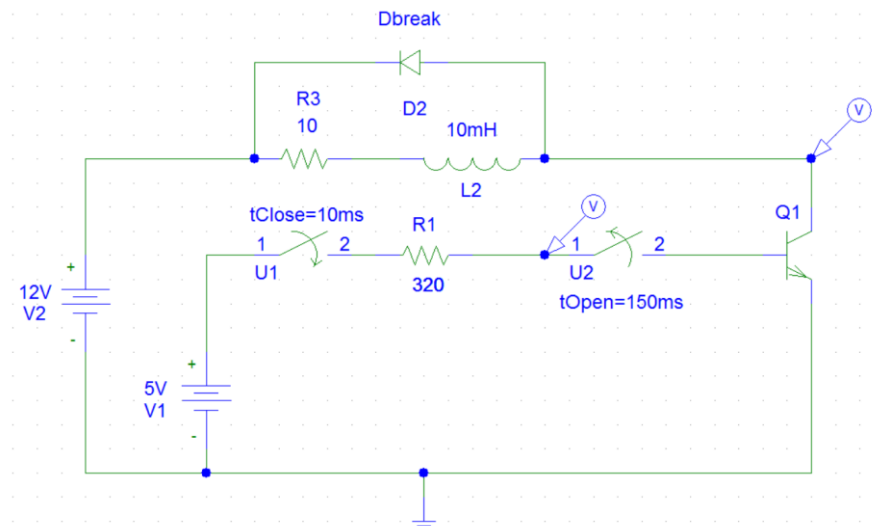


Figura 4.16 – Esquemático do circuito de chaveamento para cargas.

A Figura 4.16 mostra o esquemático do circuito utilizado feito no PSpice, programa de simulação para circuitos elétricos. Com o intuito de verificar o comportamento da carga, o MOSFET foi substituído pelo transistor Q1, pois não havia o MOSFET na biblioteca. Com isso é possível simular o comportamento do sistema na fase de transição. A Figura 4.17 apresenta a variação de tensão nos terminais do transistor Q1.

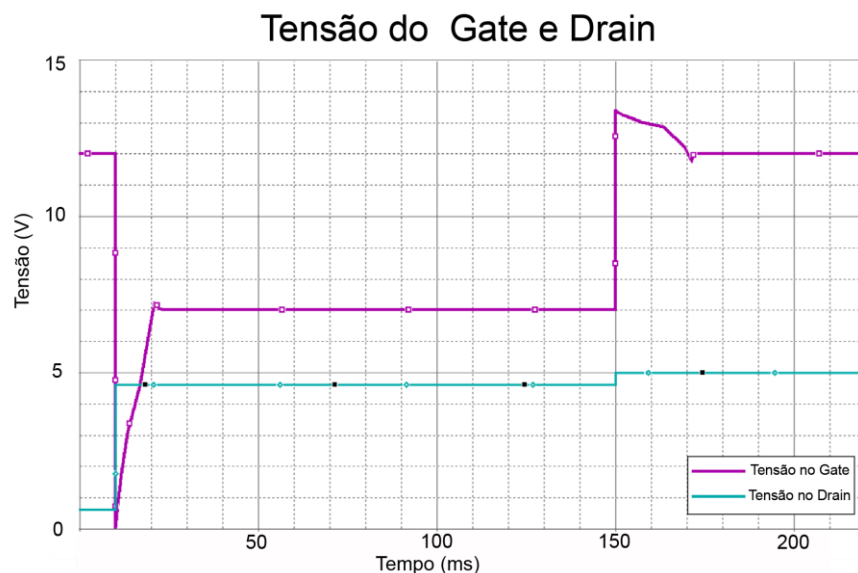


Figura 4.17 – Tensão nas portas Gate e Drain do MOSFET

Em seguida foi feita um novo esquemático no KiCad, com o intuito de projetar a Placa de Circuito Impresso (PCI). A Figura 4.18 mostra o esquemático completo de 1 canal de potência.

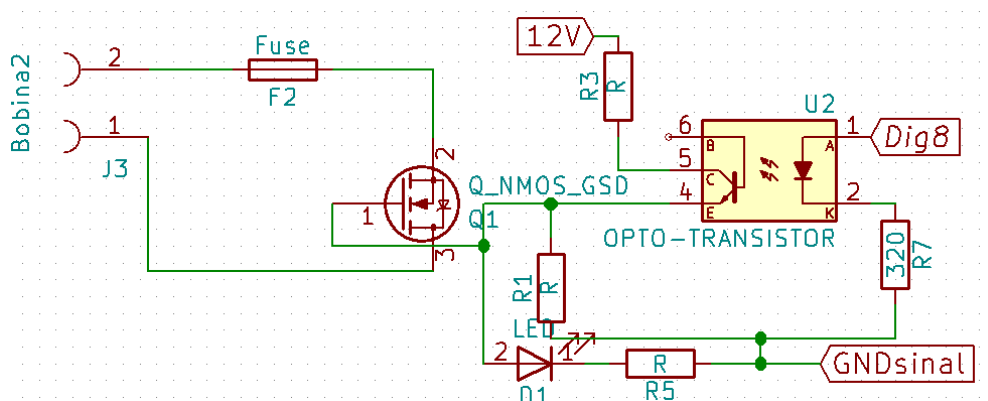


Figura 4.18 – Circuito de potência para acionamento de carga.

Nesse circuito foi utilizado além do MOSFET do tipo IRF 540, para chaveamento das cargas, foi também utilizado um fusível de proteção e um optoacoplador para proteger o circuito de baixa tensão.

É muito importante a utilização desses dois últimos componentes nesse projeto em específico. O fusível evita que correntes elétricas de magnitudes maiores ocorram. Portanto protege a placa elétrica de possíveis sobrecargas que possam ocorrer acidentalmente. Já o opto acoplador atua na transmissão do sinal de baixa potência (Arduino Uno) para a alta potência (MOSFET), protegendo e separando fisicamente todos os componentes do circuito eletrônico da parte elétrica (alta corrente) da placa. Portanto caso ocorra a queima de um componente na parte elétrica isso não afetará o circuito eletrônico de baixa potência.

Além disso a corrente de entrada, para acionamento do opto acoplador 4N25 é de 10 mA, bem inferior a corrente máxima que o Arduino pode oferecer (40 mA). O que permite o acionamento de mais canais de potência (acionamento de MOSFET) com a mesma porta digital.

O esquemático da Figura 4.18 representa um canal, a placa do circuito terá ao total 8 canais, porém apenas 2 serão utilizadas para esse projeto. Cada um será responsável por acionar uma das válvulas pneumáticas. A Figura 4.19 mostra a placa final construída.

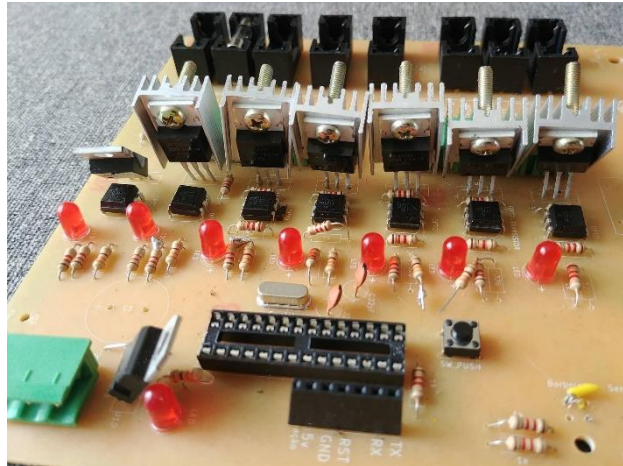


Figura 4.19 – Placa de potência com os 7 canais de MOSFETs.

Capítulo 5 – MONTAGEM E VERIFICAÇÃO

5.1. Sistema Pneumático

A montagem dos componentes foi dividida em 3 etapas:

1. Montagem em CAD;
2. Verificação;
3. Montagem real;

A primeira etapa foi realizada através de software CAD 3D, onde foram escolhidos pontos específicos no carro para posicionar todos componentes deste projeto. Essa é uma etapa muito importante, pois prevê vários possíveis problemas de interferências entre componentes. Além de exigir um bom projeto de CAD de todos os componentes utilizados no projeto, como um todo.

Em seguida, a verificação e comparação entre o projetado e o real. Nessa etapa o carro estava em fase de montagem e por isso foi possível verificar algumas alterações que seriam necessárias para finalizar o posicionamento dos componentes.

Por último, foram adquiridos todos os componentes que eram necessários para a construção do projeto. A Tabela 5.1 mostra todos itens utilizados nesta etapa:

Tabela 5.1 – Lista de componentes usados na montagem do sistema pneumático.

Componente	Unidade
Atuador pneumático	1
Válvula pneumática 3/2	2
Engate rápido 6 mm 1/8"	7
Regulador de vazão	2
Tubo pneumático	3 metros
Parafuso M 10	3
Porca M 10	3
Chapa de aço 1020	-
Cilindro de ar comprimido	1
Regulador de pressão	2

A Figura 5.1 mostra o sistema pneumático instalado no carro:

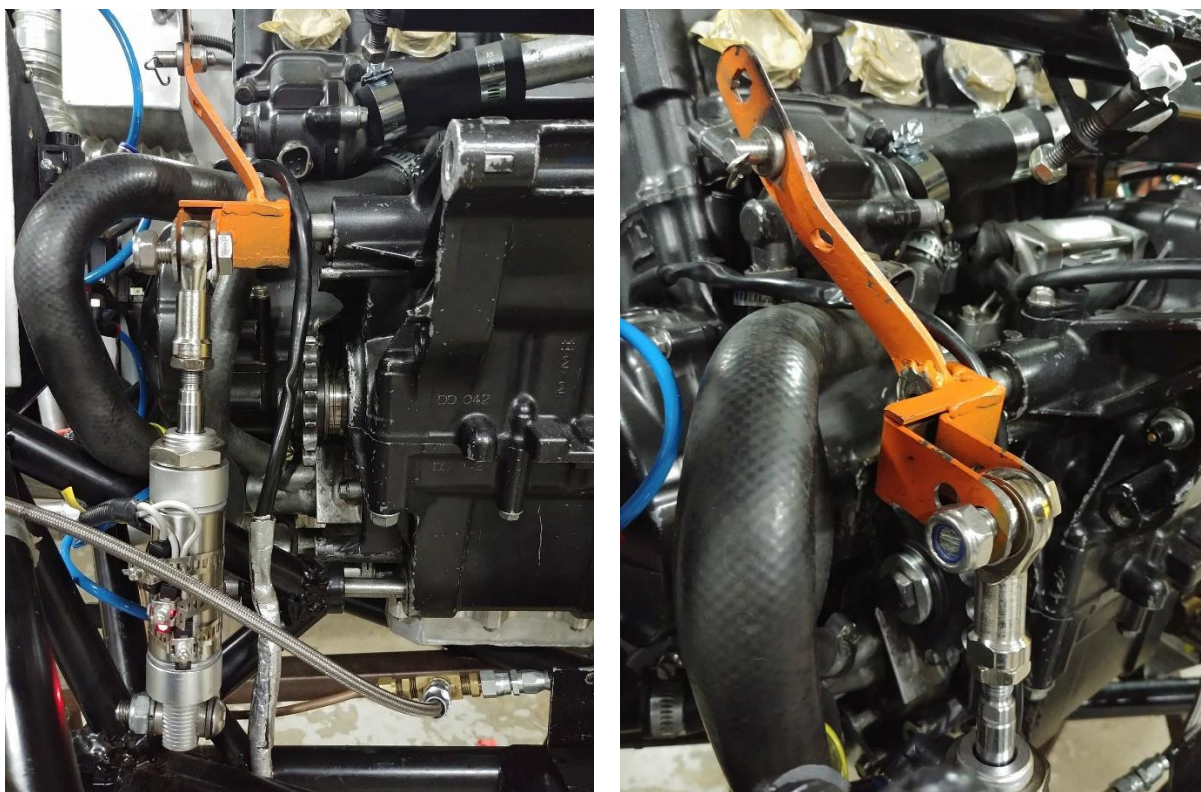


Figura 5.1 – Atuador pneumático instalado no carro.

Além do posicionamento do atuador, também foi verificado ao deslocamento angular realizado pela alavanca de câmbio. Essa medição foi realizada utilizando um angulometro digital. A Tabela 5.2 mostra o tipo de movimento do atuador, os ângulos determinados para que ocorra a troca e os ângulos medidos no mecanismo.

Tabela 5.2 – Medição do deslocamento angular do eixo do câmbio.

Tipo de movimento	Ângulo Simulado	Ângulo medido
Avanço	12°-15°	13,5
Recuo	12-15°	14,2

Com isso, é possível verificar que a montagem e a fase de fabricação afetaram o resultado final, porém ainda assim dentro do esperado para que não comprometesse o funcionamento do sistema.

5.2. Sistema Elétrico

A placa do circuito elétrico foi testada utilizando cargas de maior potência, se comparada com as válvulas pneumáticas. O primeiro teste foi realizado com a ventoinha de 80W. Nesse teste o MOSFET forneceu uma corrente de 6 A, aproximadamente, durante o tempo de teste de 30 minutos. Uma vez validado o conceito e a robustez do circuito, retiramos a ventoinha e adicionamos a bomba de combustível para ser acionada. Nessa situação, com a cargas de 120 W foi detectado um superaquecimento no MOSFET, mesmo utilizando o dissipador de calor. A Figura 5.2 mostra o teste realizado com a bomba de combustível.



Figura 5.2 – Teste do sistema elétrico no acionamento da bomba de combustível.

É possível verificar que o multímetro marcava 9,7 A de corrente elétrica no circuito, valor bem menor que o MOSFET pode suportar. Porém ocorreu um superaquecimento das vias de cobre na placa. Por esse motivo a bomba será acionada por relé. Porém isso não afetará o plano inicial do acionamento das válvulas pneumáticas, já que possuem potência muito inferior.

Capítulo 6 – CONCLUSÃO

O projeto de automatização de troca de marcha foi concluído com sucesso. Contudo ainda existe um longo caminho de amadurecimento e melhoria constante do mesmo. Além disso, o sistema não foi testado plenamente, já que o carro necessita de novas peças para poder andar e com isso testar o mecanismo.

Os deslocamentos linear e angular do atuador pneumático e do eixo de alavanca foram medidos e o resultado foi compatível com o determinado em simulações, as pequenas variações são devido a fase de fabricação, na qual é, em sua grande parte, artesanal. Portanto nessa fase não se consegue uma grande precisão entre os alinhamentos dos planos do atuador com a alavanca de câmbio, por exemplo. Como o cilindro está superdimensionado, esse pequeno desalinhamento, que já era esperado, não afetará a vida útil do atuador e nem do conjunto mecânico.

Já o sistema elétrico, foi testado com outras cargas de maior potência em relação às válvulas pneumáticas, como a bomba de combustível (120 W). Nesse teste um único MOSFET forneceu a potência elétrica para a bomba, passando mais de 10 A por ele durante mais de 10 minutos. Além disso, a placa também foi testada utilizando uma ventoinha de 80W, como carga, durante 30 minutos. Em conclusão aos testes, foi verificado um sobreaquecimento do MOSFET, mesmo utilizando o dissipador de calor. A aplicação de uma refrigeração mais eficiente nesses componentes será necessária.

Capítulo 7 – PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de melhorar o sistema de troca de marcha, para obter melhores resultados durante as competições são aconselháveis os seguintes trabalhos e modificações neste projeto.

7.1. Sincronização dos sistemas

Ambos os sistemas elétrico e pneumático e a aplicação do *quick shifter* devem trabalhar de modo sincronizado com o motor. Os sinais da roda fônica são essenciais para isso. Os conhecimentos adquiridos da matéria Motores de Combustão Interna são imprescindíveis para determinar o tempo exato para mudança de marcha. Além de realizar testes no dinamômetro.

7.2. Implementação dos componentes dimensionados

Por se tratar de um projeto novo, que está sendo implementado pela primeira vez na equipe, é importante que os componentes estejam dimensionados corretamente. Porém devido a limitações tanto de tempo quando financeiro, não foi possível adquirir e implementar os componentes dimensionados neste trabalho.

Por se tratar de um carro para competição, o peso é uma variável que deve se manter baixo. Portanto, escolhendo componentes menores será possível diminuir a massa do sistema e manter o projeto confiável.

Referências Bibliográficas

- [1] Gearbox, Formula 1, disponível em: <
<https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/understanding-f1-racing/power-unit---gearbox.html> > Acessado em 19 de Junho de 2017.
- [2] DIAS, João. Curso de especialização em engenharia automotiva - transmissões. UTFP, Paraná, 2011.
- [3] Quick Shifter, Dynojet, disponível em: <
http://www.powercommander.com/powercommander/products/QuickShifter/powercommander_quick_shifter.aspx> Acessado em 25 de Janeiro de 2017;
- [4] Holinger Engineering, sistemas pneumáticos, disponível em: <
<http://holinger.com.au/showroom/pneumatic-shifters>> Acessado em 25 de Janeiro de 2017;
- [5] Sistema troca de marcha, Geartronic, disponível em: <
<http://www.geartronics.co.uk/paddleshift.htm> > Acessado em 25 de Janeiro de 2017;
- [6] Rockwell Automation. Automação Elétrica de Processos Industriais, EPUSP.
- [7] SILVA, E. C. N. S. Apostila de Pneumática. Escola Politécnica da USP, São Paulo-SP, 2002.
- [8] Werk-schott – Catálogo Cilindros pneumáticos – Cilindros Mini ISSO – Série CWMI, p. 81;
- [9] FIALHO, Arivelto Bustamante. Automação pneumática: projetos, dimensionamento e análise de circuitos. Érica, 2009.
- [10] Datasheet IRF 540 – MOSFET: <https://www.vishay.com/docs/91021/91021.pdf> acessado em 25 de Janeiro 2017;
- [11] BUCK, B. Manual de ar comprimido e gases. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- [12] Cilindros Normalizados e Convencionais DSNU/ESNU, Festo.
- [13] Solenoid Coil Datasheet, Festo; pág. 14
- [14] GILLESPIE, Thomas D. Vehicle Dynamics. Warren dale, 1997.
- [15] HEISLER, Heinz. Advanced vehicle technology. Elsevier, 2002.
- [16] VIET, Ngo Dac. Gear Shift Strategies for Automotive Transmissions. PhD Diss, 2012.
- [17] Lyon, K., "The Chrysler "Quick Shift Neon" Automanual Transmission Project," SAE Technical Paper 983082, 1998, doi:10.4271/983082

APÊNDICE

I. IMAGENS DO MOTOR

As imagens a seguir mostram o atual sistema aplicado no carro, totalmente manual, em que cabe ao piloto acionar a embreagem e a alavanca de troca de marcha. A primeira imagem mostra o eixo do câmbio e a alavanca de torção do mesmo, o sistema está conectado à um cabo que leva ao *cockpit*, onde o piloto faz a troca.



Figura I.1 – Eixo da troca de marcha.

A imagem a seguir mostra o teste de tração realizado na alavanca da marcha para determinar o torque necessário para o acionamento da troca, posteriormente ao teste foi calculado a distância entre o centro do eixo de rotação e o ponto de fixação do sensor de tração, medindo aproximadamente 20 cm. Com esses dados foi possível calcular o torque.

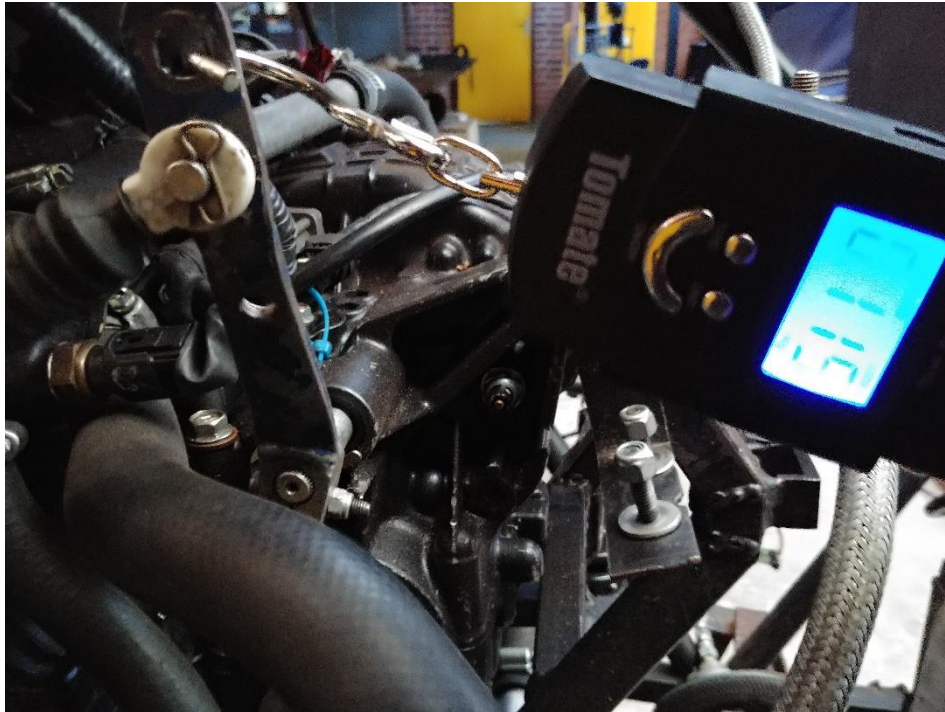


Figura I.2 – Teste de tração.

A imagem a seguir mostra uma foto geral do motor, onde será aplicado o pistão pneumático.

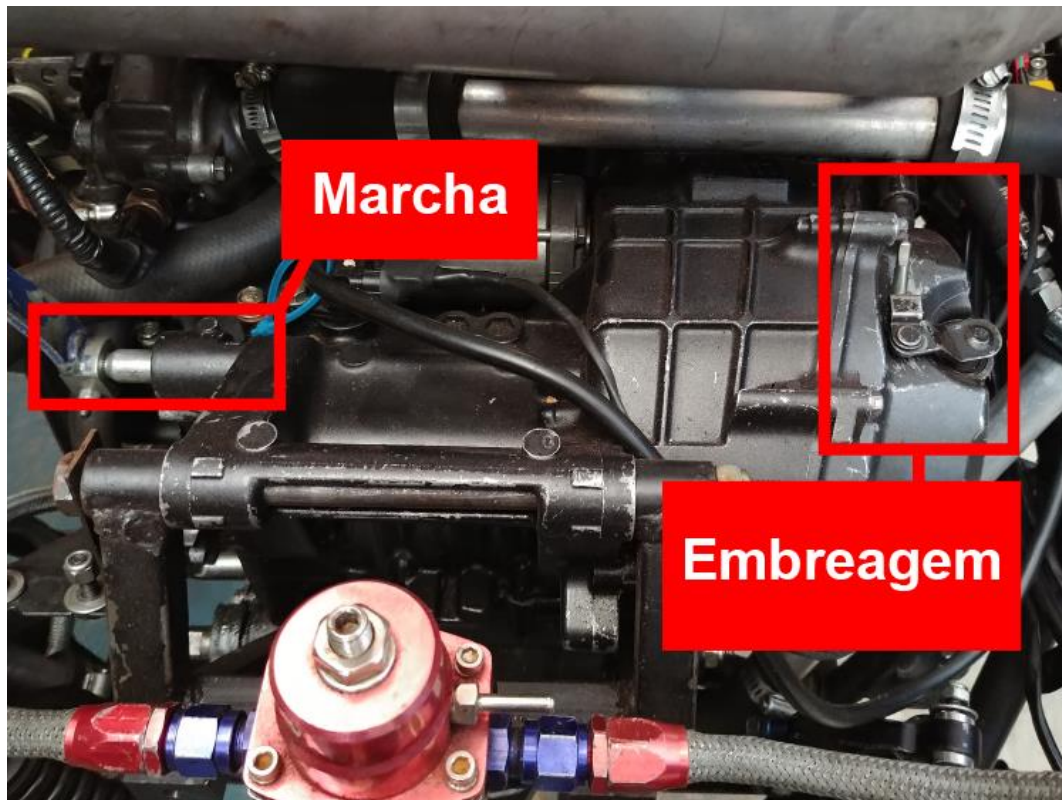


Figura I.3 – Imagem do motor; área onde ficará o pistão.

II. MEMORIAL DE CÁLCULO

As Figura 7.1 e Figura 7.2 mostram o desenvolvimento do cálculo utilizado para o dimensionamento dos diâmetros de eixo para os casos 1 e 2 (Figura 3.5), respectivamente.

Calculo do diâmetro da haste

Crítério de Euler

$$d = \left(\frac{64 \cdot S \cdot \lambda^2 \cdot F_a}{\pi^3 \cdot E_m} \right)^{1/4} \quad \text{Caso 1}$$

$S = \text{Fator de segurança} = 3,5$

$\lambda = \text{Comprimento de flambagem (m)} = 0,6 \text{ m}$

$F_a = \text{Força de avanço (N)} = 152 \text{ N}$

$E_m = \text{Módulo de Elasticidade do aço} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

$$d = \left(\frac{64 \cdot 3,5 \cdot 0,6^2 \cdot 152}{\pi^3 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \right)^{1/4}$$
$$d = \left(\frac{12257,28}{6,201 \cdot 10^{12}} \right)^{1/4} \Rightarrow d = (1,9 \cdot 10^{-9})^{1/4} = \underline{\underline{6,6 \text{ mm}}}$$

Figura 7.1 – Critério de Euler para dimensionamento do diâmetro da haste para o caso 1 (Figura 3.5)

Caso 2

$S = \text{Fator de segurança} = 3,5$

$\lambda = \text{Comprimento de flambagem (m)} = 0,3\text{m}$

$F_a = \text{Força de avanço (N)} = 152\text{ N}$

$E_m = \text{Módulo de Elasticidade do aço} =$
 $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$

$$d = \left(\frac{64 \cdot 3,5 \cdot 0,3^2 \cdot 152}{\pi^3 \cdot 2 \cdot 10^{11}} \right)^{1/4}$$

$$d = \left(\frac{3064,32}{6,201 \cdot 10^{12}} \right)^{1/4} \Rightarrow d = \left(4,94 \cdot 10^{-10} \right)^{1/4} = \underline{\underline{4,7 \text{ mm}}}$$

Figura 7.2 – Critério de Euler para dimensionamento do diâmetro da haste para o caso 2
(Figura 3.5)

III. COMPARAÇÃO DE PROJETO E MONTAGEM

Por se tratar de um projeto complexo, em que várias subequipes trabalham para ao fim unir os projetos individuais em um só, é muito importante que o construído seja mais próximo do projetado. As Figura 7.3 e 7.4 mostram o sistema montado e o projetado, respectivamente.

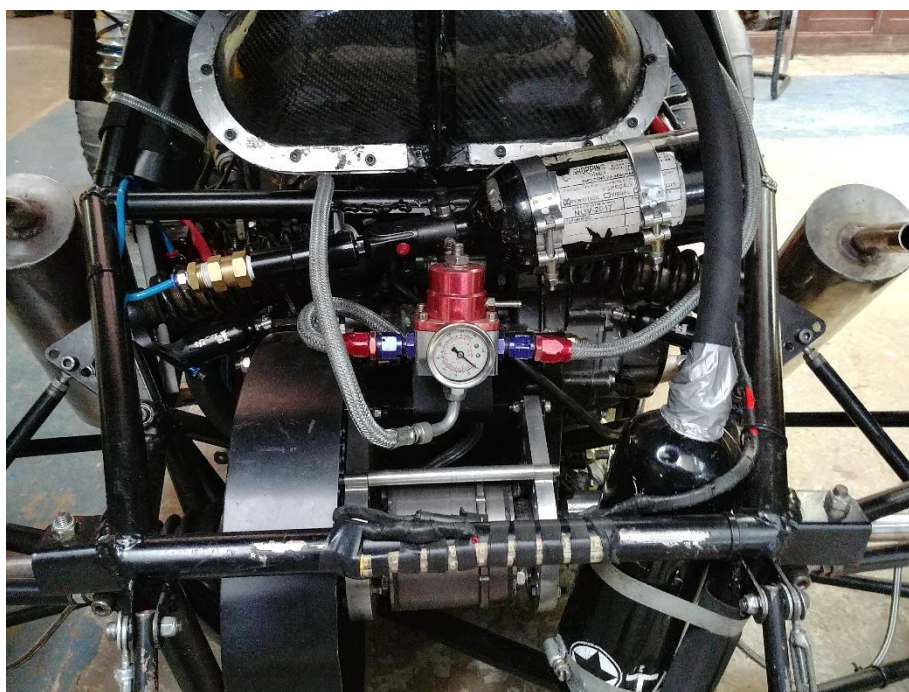


Figura 7.3 – Parte traseira do carro. Fixação do reservatório de ar comprimido.

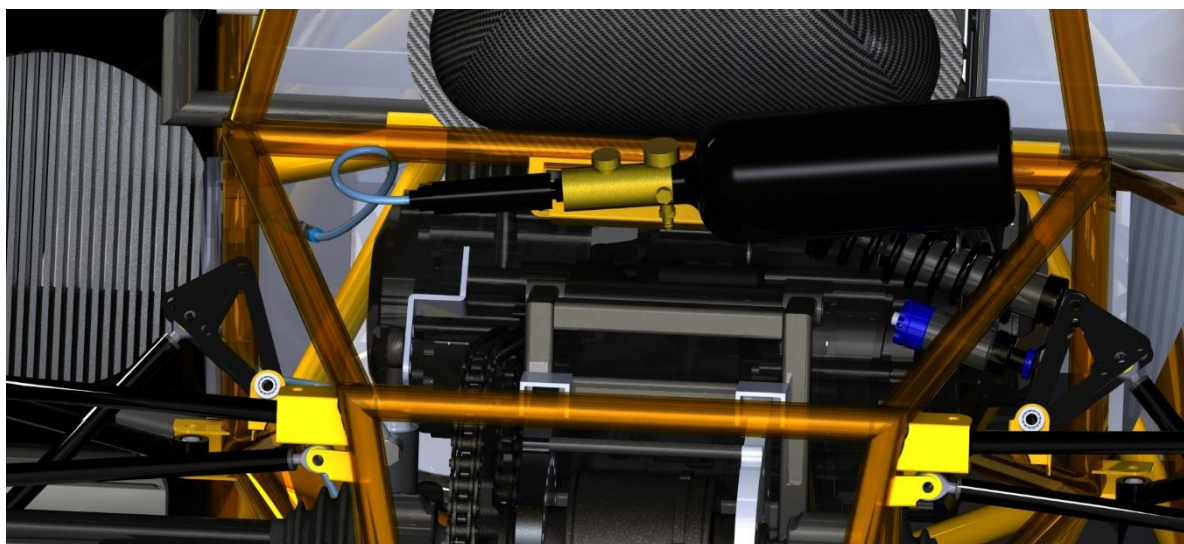


Figura 7.4 – Parte traseira do carro. Posicionamento do reservatório de ar comprimido.

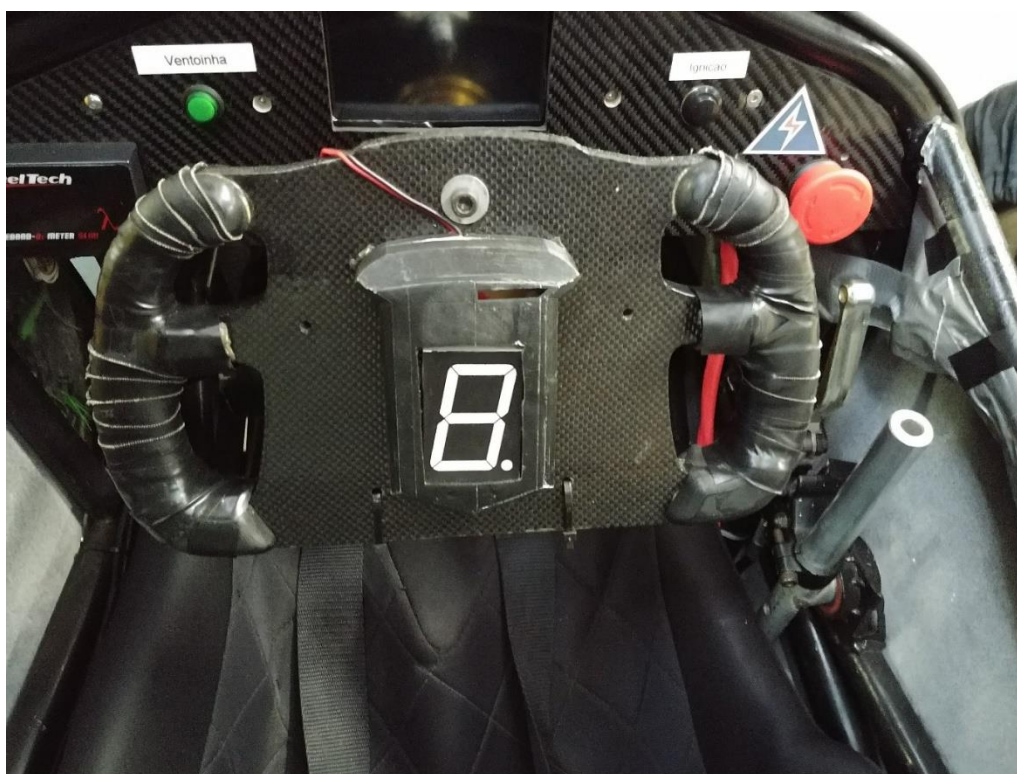


Figura 7.5 – Display indicador de marcha acoplado no volante.



Figura 7.6 – Display indicador de marcha projetado.

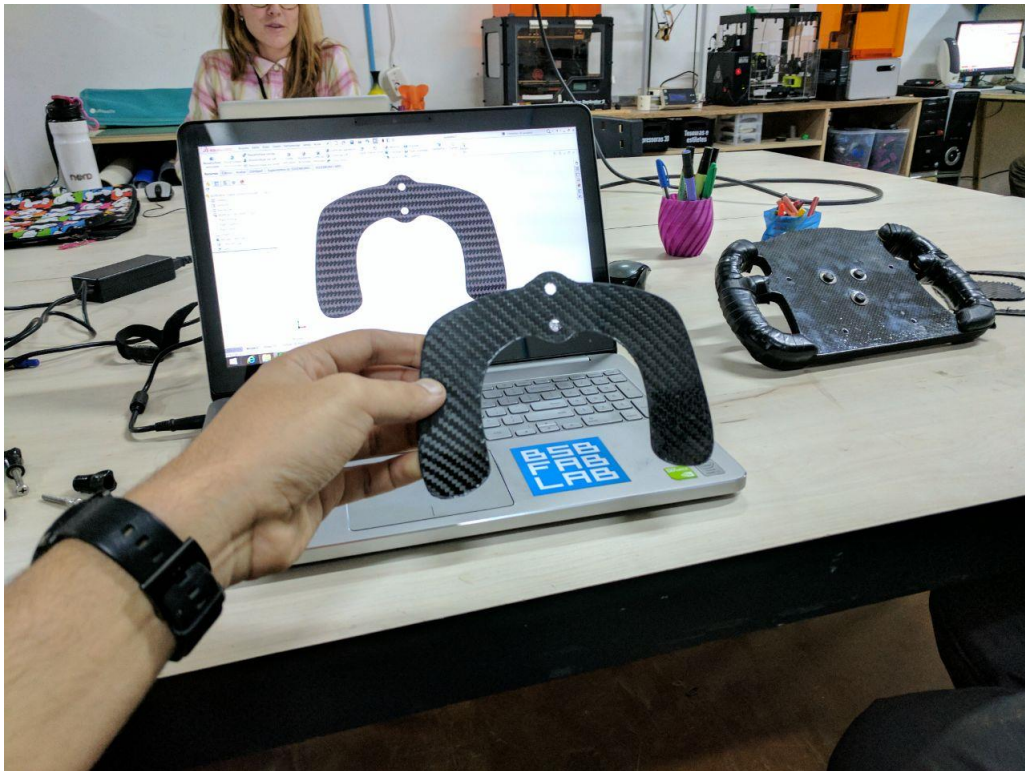


Figura 7.7 – Etapa de fabricação da aletas de troca de marcha.

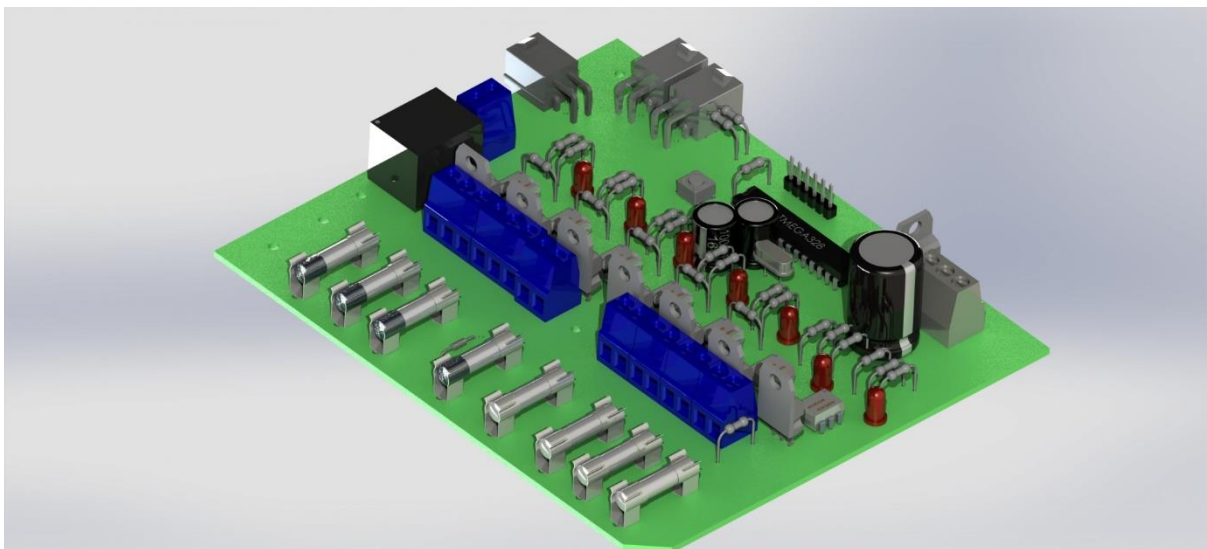


Figura 7.8 – Projeto do circuito de potência.

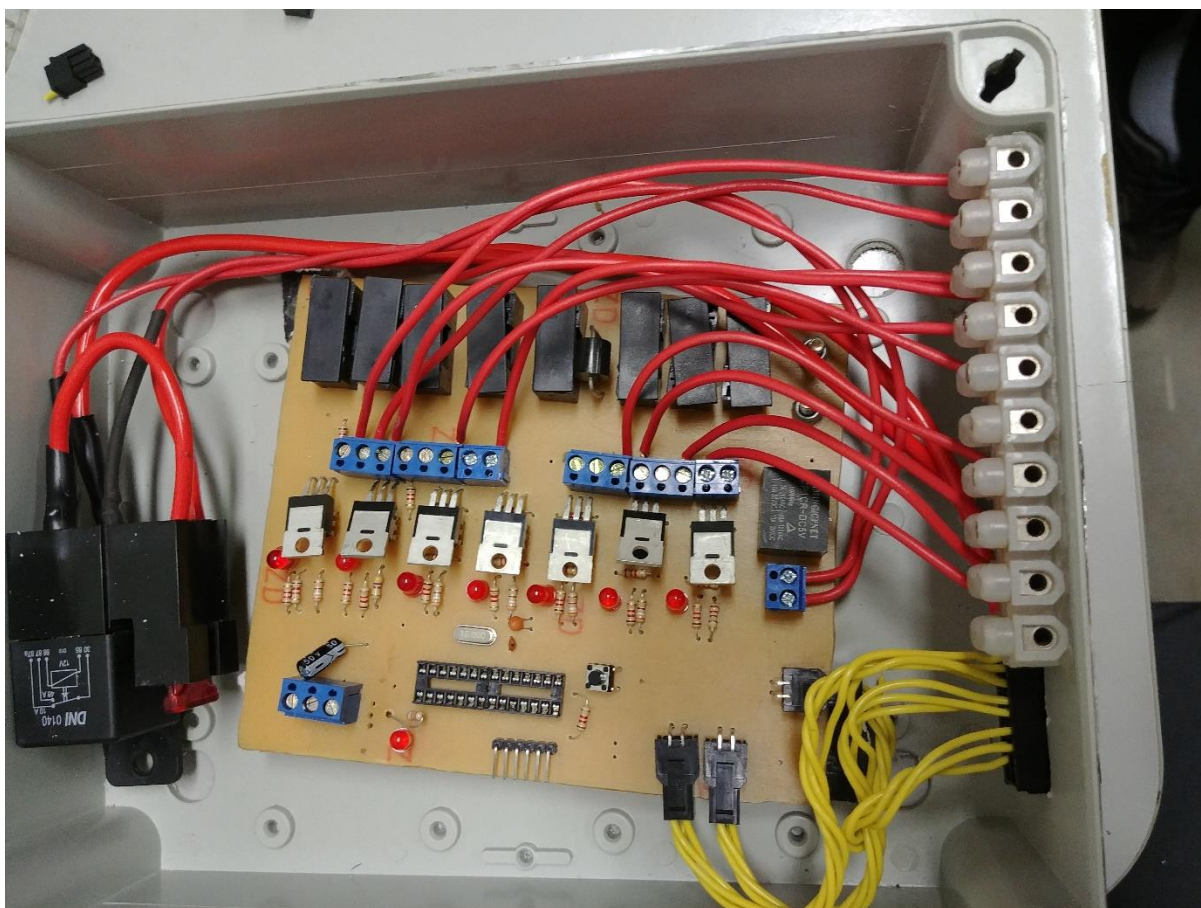


Figura 7.9 – Circuito de potência instalado.